Über die Empfindlichkeit des Telephons

für eine in der Radiotelegraphie gebräuchliche Art der Erregung.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Philosophischen Fakultät der Universität Marburg

ACAD.
GD.BAT.
BIBL.

vorgelegt von

Alfred Wratzke
aus Essen a. d. Ruhr.

Marburg i. H.
Chr. Schaaf, Spezialdruckerei für Dissertationen.
1914.

Von der Philosophischen Fakultät als Dissertation angenommen
am 5. Dezember 1913.
Berichterstatter: Prof. Dr. F. Richarz.

Meinen lieben Eltern

in Dankbarkeit gewidmet.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Einleitung: Hohe Funkenfrequenz in der drahtlosen Telegraphie. Formulierung der Aufgabe . . . . . 5—13

II. Theorie der ballistisch-periodischen Erregung einer Telephonmembran von M. Vos . . . . . 14—27

III. Bestimmung des jedesmaligen Eigentones der Versuchstelephone 27—34

IV. Empfindlichkeitsmessungen an Telephonen bei ballistischer Erregung:

1. Methode der Untersuchung . . . . . 34—36
2. Beschreibung der Meßapparatur . . . . . 36—45
3. Ausführung der Messungen . . . . . 45—47
4. Resultate der Messungen und Besprechung derselben . 47—59

V. Schluß: Zusammenfassung der Resultate und Folgerungen aus den Resultaten . . . . . 59—60

Anhang:

1. Einige Messungen der Empfindlichkeit bei großem Blockkondensator (0,1 und 0,5 M.F.) . . . . . 61—64

2. Versuche der Marburger radiotelegraphischen Station über die Empfindlichkeit des Empfangstelephones bei verschiedenen Funkenfrequenzen in der Sendestation . . . . . 64—66

Einleitung.

Hohe Funkenfrequenz in der drahtlosen Telegraphie. Formulierung der Aufgabe.

Wenn wir die mit gedämpften Wellenzügen arbeitenden Methoden der drahtlosen Telegraphie betrachten, so zeigt sich ein wesentlicher Unterschied zwischen den älteren Systemen der drahtlosen Telegraphie und dem modernen Löschfunkensystem[1]), der darin besteht, daß die älteren Systeme Funkenzahlen von 20 bis 30 in der Sekunde anwenden, das Löschfunkensystem dagegen mit Funkenzahlen von 1000 und mehr in der Sekunde arbeitet.

Die Verwendung niederer Funkenzahlen bei den älteren Systemen hat seinen Grund in der Eigenart des früher im Empfangssystem benutzten Detektors. Die Wirkung auf den Branly'schen Kohärer ist durch den ersten Wellenzug vollkommen ausgelöst: der Kohärer verlangt nämlich zu seiner Betätigung, daß jeder einzelne Wellenzug eine Maximalamplitude der Schwingungen von bestimmter Größe im Empfangssystem induziert. Ist diese Bedingung erfüllt, und hat der Kohärer einmal angesprochen, so tragen die weiterhin eintreffenden Wellenzüge nichts mehr zu seiner Wirkung bei. Der Kohärer muß erst wieder durch Klopfen „entfrittet" werden, ehe er von neuem gebrauchsfähig ist. So kommt es, daß eine Funkenzahl von 20 bis 30 in der Sekunde sich stets als vollkommen ausreichend

1) Arco, Das neue Telefunkensystem, Jahrbuch der drahtlos. Telegraphie und Telephonie Bd. II, p. 551; 1909.

erwiesen hat, während eine Funkenzahl über 30 hinaus eine Energieverschwendung bedeutet.

Verändert wurden die Verhältnisse durch die Einführung der sogenannten summierenden Detektoren in die Praxis, wie die elektrolytische Zelle und vor allen Dingen durch die Einführung der Kontaktdetektoren, die als Gleichrichter arbeiten. Diese Detektoren haben zunächst einmal die Eigenschaft, jede einzelne Welle eines Wellenzuges auszunutzen und sind ferner im Stande auf jeden ankommenden Wellenzug zu reagieren, mögen auch die Wellenzüge in einer Zahl von etwa 1000 in der Sekunde ankommen, da sie sofort nach dem Ansprechen wieder aufnahmefähig sind. Es zeigt sich daher bei Einführung dieser Art von Detektoren in die Praxis das Bestreben, die sekundliche Funkenzahl am Sender zu erhöhen. Doch hierbei stieß man zunächst auf Schwierigkeiten. Bei hoher Funkenzahl stellte sich nämlich eine starke Erhitzung der Elektroden an der Funkenstrecke ein. Dadurch wurde die Entionisierung der Funkenstrecke erschwert und infolgedessen die „Zündspannung", das ist die Spannung, bei der der Funke einsetzt, herabgedrückt und somit die Amplitude der Schwingung verringert. Eine weitere Folge der geringen Entionisierung bestand darin, daß eine starke Neigung zur Lichtbogenbildung auftrat. Ferner machte sich eine ungleichmäßige Abnützung der Elektroden und daher Unregelmäßigkeiten der Schwingungen geltend. Diese Übelstände hatte man zu umgehen gewußt, indem man statt der feststehenden Elektroden rotierende Elektroden[1]) konstruierte. Es würde zu weit führen, hierauf näher einzugehen; jedenfalls hatte man auf diese Weise eine Möglichkeit gefunden, die Funkenzahl im Sender zu erhöhen. Allerdings ist die zur Ausführung dieser Methode notwendige Apparatur derartig kompliziert, daß man nur auf ganz großen Stationen diesen Weg gewählt hat.

Auf sehr viel einfachere Weise wurde das Problem, im Sender eine hohe Funkenzahl zu erreichen, durch das System der tönenden Löschfunken gelöst. Die Wirkungsweise des Wien'schen Systems der Stoßerregung beruht bekanntlich in der

---

1) Vgl. hierüber Zenneck, Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie p. 241, 1913.

Hauptsache auf der starken Entionisierung der Funkenstrecke. Im Augenblicke, wenn die Amplitude der Schwingungen im Primärsystem zum ersten Male ein Minimum geworden, und die ganze Energie in das Sekundärsystem herübergewandert ist, wird durch möglichst schnelle Entionisierung der Funkenstrecke dafür gesorgt, daß die vom Sekundärsystem aus rückwärts im Primärsystem induzierte elektromotorische Kraft nicht mehr ausreicht, um die Funkenstrecke zu durchschlagen. Die Schwingungen im Primärsystem setzen, nachdem sie das Sekundärsystem „angestoßen" haben, vollkommen aus, und das Sekundärsystem schwingt mit der ihm eigenen Frequenz und Dämpfung weiter, als ob das Primärsystem nicht vorhanden wäre. Die Schwingungen im Primärsystem dauern also nur sehr kurze Zeit an. Infolgedessen tritt nur eine geringe Erhitzung der Elektroden ein, sodaß die oben erwähnten Übelstände fortfallen. So steht beim System der Löschfunken nichts der Möglichkeit im Wege, ohne größere Schwierigkeiten 1000 und mehr Wellenzüge in der Sekunde ausstrahlen zu können.

Wenn nun eine ununterbrochene Reihe von Wellenzügen in regelmäßiger Folge, etwa 1000 in der Sekunde, auf ein mit einem Gleichrichter verbundenes Empfangstelephon auftrifft, so entsteht im Empfangstelephon ein musikalischer, reiner Ton von der Tonhöhe 1000. Man hatte so in Bezug auf die Empfangsstation ein Ziel erreicht, dem die Entwickelung der drahtlosen Telegraphie im letzten Jahrzehnt zustrebte.

Ehe ich auf die Vorteile eingehe, die mit dem Zustandekommen eines musikalischen Tones im Empfangstelephon verknüpft sind, möchte ich zunächst ganz kurz auseinandersetzen, wie man sich das Entstehen des Tones im Empfangstelephon zu denken hat.

Es mögen von einer Sendestation 1000 Wellenzüge in der Sekunde ausgestrahlt werden mit einer Wellenlänge von etwa 600 m. Diese Schwingungen treffen nun auf eine Empfangsstation. In der schematischen Figur 1 stellt das stark ausgezogene System das Luftleitersystem dar. Es soll bestehen aus der Antenne, der Selbstinduktionsspule L_1 und einem Drehkondensator C_1. Von der Spule L_1 kann man mit Hilfe von Kontakten eine verschieden große Anzahl von Windungen in

die Antenne einschalten und so durch Veränderung der Selbstinduktion und Kapazität des Drehkondensators die Wellenlänge der Antenne auf die ankommende Welle von etwa 600 m Wellenlänge abstimmen; wenn Resonanz vorhanden ist, wird die Amplitude der im Luftleitersystem induzierten Schwingungen ein Maximum. Mit der Spule L_1 ist der sogenannte aperiodische Detektorkreis gekoppelt, und zwar sei wie in der Figur leitende Koppelung angenommen. Der aperiodische Detektorkreis besteht aus einem Detektor D, etwa einem Bleiglanz-Graphitdetektor und aus einem Blockkondensator C_2, dessen Kapazität man gewöhnlich

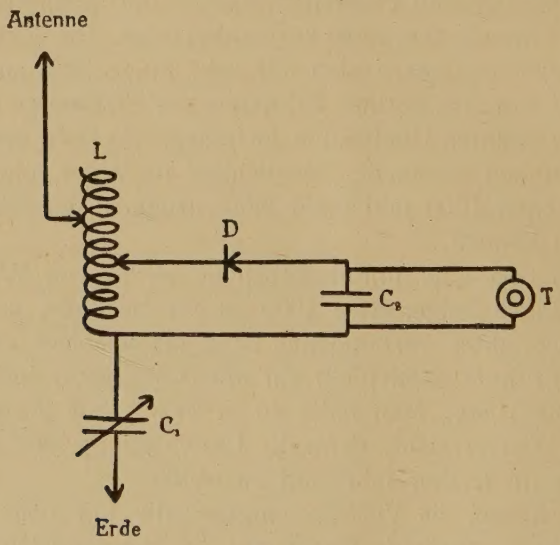

Fig. 1.

ungefähr 1000 bis 5000 cm groß[1]) zu nehmen pflegt. Parallel zum Blockkondensator liegt das Empfangstelephon T. Wenn nun in der auf Resonanz eingestellten Antenne durch eine auftreffende Welle eine Schwingung induziert worden ist, es sei zunächst zur Vereinfachung angenommen, es treffe ein einziger Wellenzug ein, dann teilt sich infolge der Koppelung die Schwingung dem Detektorkreis mit und wird dort in folgender

1) Vgl. K. Bangert, Eigenschaften der wichtigsten Detektoren der drahtlosen Telegraphie, Phys. Ztschr. Bd. 4, p. 123, 1910; daselbst Angaben über Größe des Blockkondensators.

Weise ungeformt: Der Bleiglanzgraphitdetektor hat die Eigenschaft — wie er im Einzelnen funktioniert, soll hier nicht erörtert werden, zumal die Verhältnisse noch unklar sind — die Schwingungen gleichzurichten, bezw. er läßt von der Schwingung immer nur die eine Richtung durch. So entstehen Gleichstromstöße, die in überaus kurzer Zeit aufeinander folgen; diese gehen infolge der hohen Selbstinduktion des Telephones zunächst nicht durch das Telephon hindurch, sondern sammeln sich auf dem Blockkondensator an. Darauf entlädt sich dann der Blockkondensator durch das Telephon. Auf diese Weise durchfließt das Telephon pro Wellenzug in bestimmter Richtung ein Gleichstromimpuls. Wenn nun, wie angenommen, auf der Sendestation tausend Wellenzüge in der Sekunde abgesandt werden, wird man im Telephon 1000 Gleichstromimpulse in der Sekunde erhalten. Die Membran des Telephons bekommt 1000 Stöße in der Sekunde, und man hört im Telephon einen Ton von der Höhe 1000.

Es soll nun auf die Vorteile näher eingegangen werden, die mit dem Zustandekommen eines hohen, musikalischen Tones im Empfangstelephon verbunden sind. Dabei kommt dann auch die Frage zur Erörterung, die in vorliegender Arbeit behandelt wird.

Zunächst ist man, wenn man einen hohen Ton im Empfangstelephon hat, unabhängig von atmosphärischen Störungen. Diese machen sich gewöhnlich durch ein kurzes Knacken im Telephon bemerkbar. Man kann nun die atmosphärischen Störungen leicht als solche erkennen, wenn man einen hohen Ton im Telephon hat, bezw. es wird durch das Auftreten der atmosphärischen Störungen die Aufnahme der Zeichen nicht erschwert. Dies ist ein Punkt, der von großer Wichtigkeit ist, namentlich sobald in den Sommermonaten häufig die atmosphärischen Störungen auftreten.

Ein zweiter, sehr wesentlicher Vorteil besteht in der Möglichkeit die akustische Resonanz auszunutzen. Auf dem Prinzip der akustischen Resonanz beruht der Tonverstärker der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie[1]). Bei dieser Anordnung wird

---

1) Arco, Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie Bd. 2, p. 551, 1909.

der pulsierende Gleichstrom nicht sofort in das Telephon geschickt, sondern erst durch folgende Methode verstärkt. Der pulsierende Gleichstrom wird zunächst durch die Wickelungen eines Elektromagneten geschickt, vor dessen Polen sich ein leichter Anker befindet, der eine ausgesprochene Eigenschwingung besitzt. Diese Eigenschwingung wird auf die Zahl der Gleichstromstöße bezw. auf die Funkenzahl der Sendestation abgestimmt. Gegen diesen Anker liegt ein Mikrophonkontakt, der dann den Stromkreis einer Lokalbatterie betätigt. In diesem Stromkreis liegt wieder ein Elektromagnet, der in gleicher Anordnung ein zweites Mikrophon betätigt. Auf diese Weise wird erreicht, daß den zweiten Elektromagneten Gleichstromstöße in derselben Anzahl pro Sekunde, wie sie der Detektorstrom aufweist, durchfließen, doch ist die Amplitude der einzelnen Stöße verstärkt worden. Dieses Verfahren wird im Tonverstärker der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie noch einmal wiederholt und schließlich der Strom einer dritten Lokalbatterie dem Aufnahmetelephon, einem sogenannten lautsprechenden Telephon zugeführt. Es ist so möglich, einen Detektorstrom von ungefähr 10^{-7} bis 10^{-8} Amp. bis auf 10^{-3} Amp. zu verstärken. Es ist klar, daß diese Anordnung nur durch eine hohe und vor allem auch sehr konstante Entladungszahl, wie man sie durch das Wien'sche Löschfunkensystem erhält, betätigt werden kann.

In einer Beziehung jedoch hatten sich die Hoffnungen, die man an die Vorteile eines hohen musikalischen Tones im Empfängertelephon geknüpft hatte, nicht erfüllt. Zu einer Zeit, als man begann, die hohe Funkenfrequenz in die Praxis einzuführen, wies Austin[1]) auf die mit der hohen Funkenfrequenz verknüpften Vorteile hin und betonte vor allen Dingen im Hinblick auf Messungen über die Empfindlichkeit von Telephonen für verschiedene Tonhöhen, daß man beim Übergang zu hohen Funkenfrequenzen eine überaus große Empfindlichkeitssteigerung der Empfangsstation und infolgedessen eine entsprechende Steigerung der Reichweite zu erwarten hätte. Die Empfindlichkeitsmessungen an Telephonen, auf die sich Austin bezog, waren

---

1) L. W. Austin, Bulletin of the Bureau of Standards 1908, p. 153.

angestellt worden von M. Wien[1]), Lord Rayleigh[2]) und auch von Austin[3]) selbst.

M. Wien hatte in seiner Arbeit über die akustischen und elektrischen Konstanten des Telephons mit Hilfe der Methode der Reizschwelle für verschiedene Tonhöhen die Minimalströme festgestellt, die zur Erzeugung eines noch gerade im Telephon hörbaren Tones nötig sind. Er erregte dabei die Telephone mit rein sinusförmigem Wechselstrom, den er mit seiner Wechselstromsirene[4]) erzeugte und durch eine besondere Resonanzschaltung von „Obertönen" reinigte. Die Membran des Telephones macht so rein sinusförmige Schwingungen von der Frequenz des hineingeschickten Wechselstromes. Wien hat die Minimalströme für verschiedene Tonhöhen in einem Bereiche von 64 bis 16000 Schwingungen pro Sekunde untersucht und an einem der untersuchten Telephone (Telephon von Siemens mit 187 Ohm Widerstand) folgende Werte erhalten:

Tabelle I.

Tonhöhe	64	128	256	512	720	1024	1500	2400	4000	8000	16000
$i \cdot 10^{-8}$ Amp.	1800	220	26	1,7	1,5	3,0	6,0	2,0	50	700	2200

Man sieht, daß zur Erzeugung eines an der Reizschwelle gelegenen Tones von 64 Schwingungen pro Sekunde ein Strom von $1800 \cdot 10^{-8}$ Amp., dagegen für Töne in der Nähe von 1000 Schwingungen ein erheblich schwächerer Strom von nur ungefähr $3 \cdot 10^{-8}$ Amp. nötig ist. Ferner nehmen die Minimalströme nicht ganz kontinuierlich bis zu dieser Höhe ab, es treten vielmehr in der Nähe der Eigentöne der Membran besonders kleine Minimalströme auf. Dieser Punkt wird noch im Abschnitt III über die Bestimmung der Eigentöne näher erörtert werden. Im übrigen ist allerdings, abgesehen von diesen durch die Eigentöne bedingten Schwankungen, eine starke Abnahme der Minimal-

1) M. Wien, Ann. d. Physik. Bd. 4, p. 450, 1901.

2) Lord Rayleigh, Philosophical Magazine 38. p. 285, 1894.

3) Austin l. c.

4) M. Wien, Über die Erzeugung und Messung von Sinusströmen. Phys. Ztschr. Bd. 2, p. 245, 1900/01.

ströme festzustellen, wenn man von tiefen Tönen zu Tönen in der Höhe von 1000 übergeht. Diese Abnahme ist zu erklären durch die verschieden große Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für hohe und tiefe Töne, wie Wien in einer später veröffentlichten Arbeit[1]) noch näher ausgeführt hat.

Rayleigh hat ganz ähnliche Messungen wie Wien gemacht, es erübrigt sich näher hierauf einzugehen, da Rayleigh zu gleichen Resultaten gekommen ist.

Die Messungen von Austin beziehen sich auf ein in der Praxis der drahtlosen Telegraphie gebräuchliches Kopftelephon von 800 Ohm Widerstand. Austin hat bei einer Tonhöhe von 120 einen Minimalstrom von $3 \cdot 10^{-7}$ Amp. und bei einer Tonhöhe von 900 Schwingungen pro Sekunde einen solchen von $3 \cdot 10^{-10}$ Amp. gefunden. Auch er benutzte zu diesen Messungen sinusförmigen Wechselstrom. Er schließt an diese Messungen die Bemerkung, daß es so scheine, als ob durch Vermehrung der Funkenzahl in der drahtlosen Telegraphie die Empfindlichkeit mehrere 100 mal gesteigert werden könne. Er erwartete also, es müßten auch dort die Minimalströme, die man im Empfangstelephon mißt, dieselbe Abnahme zeigen, die er bei seinen Messungen mit sinusförmigem Wechselstrom konstatiert hatte, wenn man von einer Funkenzahl von ca. 20, wie sie bis dahin üblich war, zu Funken zahlen von ungefähr 1000 übergehen würde. Es wäre so eine viel geringere Energie bei hohen Funkenzahlen in der Empfangsstation nötig gewesen, und das hätte dann eine entsprechende Vergrößerung der Reichweite bedeutet.

Doch wie schon erwähnt, traten diese Erwartungen nicht ein. Als man die hohe Funkenfrequenz in die Praxis eingeführt hatte, machte Austin Empfindlichkeitsmessungen an Empfangstelephonen, die zur Aufnahme von Zeichen in die Empfangsapparatur einer Station für drahtlose Telegraphie eingeschaltet waren. Und zwar bestimmte Austin sowohl bei Zeichen, die von Stationen kamen, welche mit einer Funkenzahl von etwa 60 in der Sekunde arbeiteten als auch bei solchen, die hohe Funkenfrequenz hatten, die Empfindlichkeit, und da stellte es

1) M. Wien, Archiv für die gesamte Physiologie. Bd. 97, p. 1, 1903; Physikalische Zeitschrift 4, p. 69, 1902.

sich heraus, daß ein Unterschied in der Empfindlichkeit nicht eintrat. Und zwar ergab sich das eigenartige Resultat, daß die zur Erzeugung eines noch gerade im Telephon hörbaren Tones bei hohen wie tiefen Frequenzen nötigen Minimalströme mit dem Wert in der Größenordnung übereinstimmten, den er an dem mit sinusförmigem Strom erregten Telephon bei der Tonhöhe 900 gemessen hatte. Austin sucht diese merkwürdige Erscheinung durch die Annahme zu erklären, daß die Funken bei niederen Frequenzen stets mehrfach seien und infolgedessen höhere Töne erzeugen könnten, die dann eine gesteigerte Empfindlichkeit bei tiefen Frequenzen hervorrufen würden. Als zweite Möglichkeit gibt Austin an, daß die Membran vielleicht durch die kurzen und scharfen Stöße, denen sie in der Empfangsschaltung ausgesetzt ist, wirksamer bewegt wird, als bei sinusförmiger Erregung. Abgesehen von diesen Vermutungen geht Austin auf eine Erklärung der vorliegenden Verhältnisse nicht ein. Es bleibt also immer noch die Frage unentschieden, woher es kommt, daß die infolge der größeren Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für hohe Töne zu erwartende Empfindlichkeitssteigerung nicht eintritt, wenn man zu hohen Frequenzen übergeht.

M. Vos[1]) hat nun die vorliegende Frage von theoretischer Seite her in Angriff genommen und die Bewegung der Telephonmembran im Einzelnen untersucht, wenn man die Erregung der Membran so voraussetzt, wie sie den in der drahtlosen Telegraphie vorliegenden Verhältnissen entspricht.

Die experimentellen Untersuchungen vorliegender Arbeit knüpfen an diese von Vos entwickelte Theorie der ballistischen Erregung von Telephonmembranen an. Es ist das Ziel vorliegender Untersuchungen, die Empfindlichkeit des Telephons in Abhängigkeit von der Tonhöhe festzustellen, bei einer durch die Verhältnisse der Empfangsschaltung gegebenen Art der Erregung.

Im nächsten Abschnitt sollen zunächst Gedankengang und Resultate der von M. Vos entwickelten Theorie angegeben werden.

---

1) Die Arbeit wurde mir vom Verfasser freundlichst im Manuskript zur Verfügung gestellt. Sie ist inzwischen erschienen in den Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft Bd. 16, 1914.

II. Theorie der ballistischen Erregung einer Telephonmembran von M. Vos.

Durch die Art und Weise der Erregung in der Empfangsschaltung der drahtlosen Telegraphie bei Hörempfang sind folgende Bedingungen gegeben, von denen Vos in seiner theoretischen Entwickelung ausgeht: die Membran wird erregt durch eine Reihe von Gleichstromstößen, die in gleichen Zeiten aufeinander folgen und immer in gleicher Richtung das Telephon durchfließen. Die Dauer der einzelnen Impulse ist meistens klein gegenüber der Eigenschwingungsdauer der Membran, die so „ballistisch" angestoßen wird. Durch jeden Impuls wird der Membran eine bestimmte Geschwindigkeit erteilt, worauf dann die Membran unter dem Einfluß der elastischen und „hemmenden" Kräfte eine gedämpfte Eigenschwingung ausführt bis zu dem Augenblick, wo der nächste Impuls ihr einen erneuten Antrieb erteilt.

Um die mathematischen Beziehungen einer derartig erregten Telephonmembran zu entwickeln, knüpft Vos in seiner Abhandlung an die Eigenschwingung einer Membran an, bezw. an die elastischen Schwingungen eines Massenpunktes, da es ja, um die Bewegung der Membran der Hauptsache nach zu kennen, ausreichend ist, wenn die Bewegung ihres Mittelpunktes bekannt ist. Auf eine aus ihrer Ruhelage entfernte Membran, bezw. auf ihren Mittelpunkt wirkt zunächst einmal eine von der Enfernung des Punktes aus seiner Ruhelage abhängige rücktreibende Kraft. Man kann unter der Voraussetzung, daß die Bewegungen der Membran klein sind, annehmen, daß die rücktreibende Kraft proportional der Entfernung aus der Ruhelage ist. Es sei die Bewegungsrichtung des Membranmittelpunktes die x-Achse, seine Ruhelage der Koordinatenursprung $x = O$. Unter diesen Annahmen erhält man die Beziehung $m \frac{d^2x}{dt^2} = -k_1 x$, worin x die Entfernung aus der Ruhelage, t die Zeit, m die im Mittelpunkt der Membran konzentrierte Masse und k_1 einen Proportionalitätsfaktor bedeutet. Weiter ist nun zu berücksichtigen, daß auf die Membran auch eine Kraft wirkt, die die Bewegung zu hemmen sucht. Diese Kraft ist bedingt durch die dämpfenden

Ursachen, z. B. innere Reibung der Membran und Strahlung. Es muß also in die obige Differentialgleichung noch eine Kraft eingeführt werden, die der Bewegung entgegenwirkt. Diese Kraft kann man in erster Annäherung proportional der Geschwindigkeit setzen, und zwar ist sie ihr entgegengesetzt gerichtet. Man erhält so als Differentialgleichung für die Bewegung des gedämpft schwingenden Membranmittelpunktes

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -k_1 x - k_2\frac{dx}{dt}\ ^{1}),$$

worin k_2 ein zweiter Proportionalitätsfaktor ist. Durch eine einfache Umformung dieser Gleichung erhält man:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + K_2\frac{dx}{dt} + K_1 x = 0 \tag{1}$$

worin K_1 und K_2 neue Proportionalitätsfaktoren sind. Nach den allgemeinen Integrationsregeln homogener, linearer Differentialgleichungen erhält man als Lösung im Falle, daß Eigenschwingungen möglich sind, d. h. wenn $K_2^2 < 4K_1$, die Beziehung:

$$x = C_1 e^{-\delta t}\cos\omega t + C_2 e^{-\delta t}\sin\omega t. \tag{2}$$

Hierin ist gesetzt:

$$\frac{K_2}{2} = \delta \text{ und } \sqrt{K_1 - \frac{K_2^2}{4}} = \omega.$$

δ bedeutet die Dämpfung und ω die Eigenfrequenz der Membran, und zwar ist ω die sog. Kreisfrequenz, d. h. die Anzahl der Schwingungen in 2π Sekunden, sodaß also $\omega = 2\pi N$, wenn $\frac{1}{N} = T$ die Eigenschwingungsdauer der Membran bedeutet. C_1 und C_2 sind Konstanten, die durch die Grenzbedingungen näher bestimmt werden müssen.

Bei der ballistischen Erregung der Telephonmembran muß nun offenbar die Bewegung der Membran in der Zeit zwischen

---

1) vgl. Helmholtz, Vorlesungen Bd. I, 2: Dynamik diskreter Massenpunkte, p. 95, und Vorlesungen Bd. 3: Mathematische Prinzipien der Akustik, p. 29, Leipzig 1898.

zwei Impulsen von der Form sein, wie sie durch die Gleichung (1) gegeben ist, da ja dann keine anderen Kräfte auf die Membran einwirken, als die bei der Aufstellung der Differentialgleichung eingeführten. Die beiden Konstanten C_1 und C_2 in Gleichung (2) gestatten nun, die Lösung den speziellen Bedingungen anzupassen. Wenn die Membran durch eine kontinuierliche Reihe von Impulsen erregt wird, die im Zeitintervall τ aufeinanderfolgen mögen, so stellt sich ein streng periodischer und stationärer Zustand ein, d. h. es wird die Bewegung in der Zeit zwischen zwei Impulsen in Bezug auf Grösse und Richtung immer genau dieselbe sein. Aus dieser Überlegung leitet Vos in seiner Abhandlung folgende zwei Grenzbedingungen ab: Bei stationärem Zustand muß die Elongation der Membran zur Zeit eines beliebigen Impulses und zur Zeit des nächsten Impulses gleich groß sein. Zur mathematischen Formulierung sei angenommen, daß die Zeit im Augenblicke eines bestimmten, ganz willkürlich gewählten Impulses gleich Null sei, dann ist die Zeit im Augenblicke des nächsten Impulses $t = \tau$. Es muß nun die Elongation der Membran zur Zeit $t = 0$ so groß wie zur Zeit $t = \tau$ sein. Aus Gleichung (2) folgt so: $x_{t=0} = C_1$ und

$$x_{t=\tau} = C_1 e^{-\delta\tau} \cos \omega\tau + C_2 e^{-\delta\tau} \sin \omega\tau.$$

Durch Gleichsetzung beider Elongationen erhält man dann:

$$C_1 (1 - e^{-\delta\tau} \cos \omega\tau) = C_2 e^{-\delta\tau} \sin \omega\tau.$$

Die zweite Grenzbedingung liefert folgende Betrachtung: Bei jedem Impuls bekommt die Membran eine bestimmte Geschwindigkeit erteilt, die mit v_0 bezeichnet werden möge. Ist zur Zeit eines Impulses die Membran schon in Bewegung, so wird die augenblickliche Geschwindigkeit um v_0 vermehrt. Die Geschwindigkeit wird unmittelbar vor einem Impuls immer um v_0 kleiner sein als unmittelbar nach einem Impuls. Dies läßt sich mathematisch so formulieren: Es muß zur Zeit $t = 0$ die Geschwindigkeit $\frac{dx}{dt}$ um v_0 größer sein als zur Zeit $t = \tau$. Die zweite Grenzbedingung lautet also:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=0} = \left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=\tau} + v_0.$$

Mit Hilfe dieser beiden Grenzbedingungen sind die beiden Konstanten C_1 und C_2 bestimmt, die Rechnung soll hier nicht näher durchgeführt werden[1]). Man erhält

$$C_1 = \frac{\beta \cdot v_0}{\omega\,(\alpha^2 + \beta^2)} \text{ und } C_2 = \frac{\alpha \cdot v_0}{\omega\,(\alpha^2 + \beta^2)},$$

worin zur Abkürzung gesetzt ist:

$$\alpha = (1 - e^{-\delta\tau} \cos \omega\tau) \text{ und } \beta = e^{-\delta\tau} \sin \omega\tau.$$

Die übrigen Größen haben die oben eingeführte Bedeutung. Wenn man diese Werte für C_1 und C_2 in die Gleichung (2) einsetzt, ist die Bewegung der Membran im Intervall zwischen zwei Impulsen bekannt, unter der oben gemachten Voraussetzung, daß die Membran durch eine ununterbrochene Reihe von Impulsen erregt wird.

Es ist nun mit Rücksicht auf die Empfindlichkeit des Telephons von Interesse, die Amplitude der Membranschwingungen etwas näher zu untersuchen. Zu diesem Zwecke kann man die Beziehung (2) in folgende Form bringen:

$$x = Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi), \tag{3}$$

wo dann A die Anfangsamplitude der Schwingung und φ die Phase bedeutet. Die Anfangsamplitude A ist bei der Superposition zweier Sinuswellen mit einer Phasenverschiebung von $\frac{\pi}{2}$, wie sich die vorliegende Beziehung (2) auffassen läßt, gegeben durch den Ausdruck $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$. Wenn man die obigen Werte für C_1 und C_2 einsetzt, bekommt man so also als Ausdruck für die Anfangsamplitude:

$$A = \frac{v_0}{\omega\sqrt{1 - 2e^{-\delta\tau}\cos\omega\tau + e^{-2\delta\tau}}} \tag{4}$$

Man sieht, daß die Anfangsamplitude abhängig ist von den Größen v_0, ω, δ und τ. Die Abhängigkeit von v_0, der Anfangs-

1) vgl. hierüber die Arbeit von Vos, l. c. Gleichung 2 und 3.

geschwindigkeit, und ω, der Eigenfrequenz der Membran, ist direkt zu übersehen; komplizierter ist die Abhängigkeit von der Impulsfolge. Um diese letztere Abhängigkeit näher zu betrachten, soll v_0, ω und δ als konstant gegeben sein. Bei Veränderung von τ schwankt dann der Wert der Amplitude zwischen einem Maximum und Minimum. Die Anfangsamplitude nimmt maximale Werte an, wenn $\cos \omega\tau = 1$ ist, d. h. wenn $\omega\tau = 2\pi n$, worin n eine ganze Zahl ist, mit anderen Worten, wenn τ gleich oder ein ganzes Vielfaches der Eigenschwingungsdauer T der Membran ist. Die Minima treten dann auf, wenn $\cos \omega\tau = -1$ bezw. wenn $\omega\tau = \pi n$, worin n jetzt eine ungerade Zahl bedeutet. Die Amplitude hat ein Minimum, wenn $\tau = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2} \cdots$ der Eigenschwingungsdauer ist.

Die beigegebene, der Arbeit von Vos entnommene Kurve[1]) stellt diese Abhängigkeit der Amplitude A von τ dar (Fig. 2). Die Amplituden sind nach obiger Formel (4) berechnet, unter der Annahme einer Dämpfung der Telephonmembran, bei der $e^{-\delta T} = 0{,}5$ oder $\delta T =$ Dekrement $d = -\log \text{nat} \frac{1}{2}$ ist. Was folgt nun aus diesen Betrachtungen für die Membranbewegung im Intervall zwischen zwei Impulsen? Um die Membranbewegung genau im einzelnen zu verfolgen, die ja im Intervall zwischen zwei Impulsen von der Form:

$$x = C_1 e^{-\delta t} \cos \omega t + C_2 e^{-\delta t} \sin \omega t$$

ist, müßte man noch die bei Gleichung (3) eingeführte Phase beachten, doch darauf kann man mit Rücksicht auf das Ziel der Untersuchung verzichten. Es genügt in Hinsicht auf die Empfindlichkeit des Telephons festzustellen, daß der die Anfangsamplitude zur Zeit $t = 0$ darstellende Wert von A für die Elongationen der Membran im Intervall zwischen zwei Impulsen ausschlaggebend ist. Die einzelnen Elongationen werden um so größer sein, die Membran wird um so wirksamer bewegt, desto größer der Wert der Anfangsamplitude ist und umgekehrt.

---

1) Ueber eingehende Diskussion der Kurve vergl. die Abhandlung von M. Vos, l. c. Fig. 8.

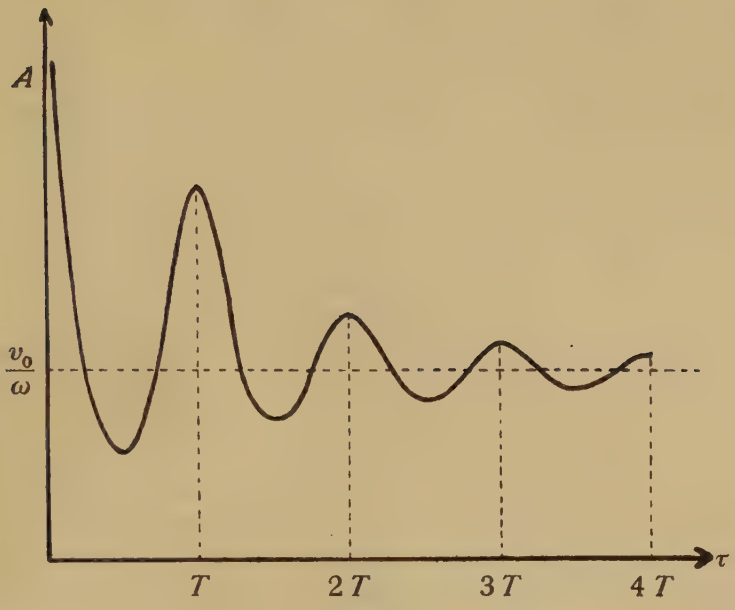

Fig. 2.
Anfangsamplitude einer im Zeitinterwall τ ballistisch angeregten Telephonmembran von der Eigenschwingungsdauer T nach M. Vos.
Dekrement d der Membran · Schwingungen $= -$ log. nat. $\frac{1}{2}$.

Allerdings wird diese Betrachtung nicht mehr gelten, wenn τ, die Zeit zwischen zwei Impulsen, erheblich kleiner ist als die Eigenschwingungsdauer T der Membran. Doch die Fälle, auf die die Theorie später angewandt wird, sind derart, daß τ immer in der Größenordnung von T liegt bezw. größer ist.

Man kommt so zum ersten Resultat der Theorie, das man ungefähr folgendermaßen zusammenfassen kann. Wird die Telephonmembran mit der Eigenschwingungsdauer T durch eine kontinuierliche Reihe gleicher Stromstöße erregt, so nimmt die Anfangsamplitude zur Zeit $t = 0$ Werte an, die in bestimmter Weise von dem Verhältnis, in dem τ zu T steht, abhängig sind. Fig. 2 stellt die Werte der Anfangsamplitude in Abhängigkeit von τ dar. Diese Werte der Anfangsamplitude sind im allgemeinen maßgebend für die Membranbewegung im Intervall zwischen zwei Impulsen, sodaß insbesondere die Membran,

wenn $\tau = T, 2T \ldots$. sehr wirksam bewegt wird, weniger wirksam, wenn $\tau = \frac{T}{2}, \frac{3T}{2} \ldots$.

Von Wichtigkeit für die Empfindlichkeit des Telephons ist es, zu untersuchen, wie sich der bei der ballistischen Erregung entstehende Schwingungsvorgang hinsichtlich seiner Obertöne verhält. Diese Frage hat Vos in dem zweiten Teil seiner Arbeit behandelt.

Es war schon gesagt, daß sich bei der ballistischen Erregung ein streng periodischer Vorgang einstellt. Im Intervall zwischen zwei Impulsen findet jedesmal ein Schwingungsvorgang von der Form:

$$x = f(t) = C_1 e^{-\delta t} \cos \omega t + C_2 e^{-\delta t} \sin \omega t$$

statt, der sich von Intervall zu Intervall wiederholt. Man hat also einen streng periodischen Vorgang mit einer Grundperiode, die durch τ, die Zeit zwischen zwei Impulsen, gegeben ist. Man kann nun jeden beliebigen Vorgang, falls er streng periodisch ist, nach Fourier in der einzelnen Periode in folgender Form darstellen:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} t + a_2 \cos \frac{4\pi}{\tau} t + \ldots a_n \cos \frac{2\pi n}{\tau} t$$

$$+ b_1 \sin \frac{2\pi}{\tau} t + \ldots\ldots + b_n \sin \frac{2\pi \cdot n}{\tau} t.$$

$f(t)$ ist die darzustellende Funktion, τ die Grundperiode, t die Zeit. a_0, $a_1 \ldots a_n$ und $b_1 \ldots b_n$ sind Konstanten. Die einzelnen Glieder $a_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} t \ldots . b_1 \sin \frac{2\pi}{\tau} t$ stellen die rein sinusförmigen Komponenten dar, aus denen sich der Schwingungsvorgang zusammensetzt. In den einzelnen Gliedern bedeutet $a_1 \ldots . a_n$, $b_1 \ldots . b_n$ die Amplituden der betreffenden Schwingung. Die Perioden der einzelnen Glieder stehen im Verhältnis $1 : {}^1/_2 : {}^1/_3$ bezw. die Frequenzen im Verhältnis $1 : 2 : 3 \ldots$. Dabei ist die Periode der ersten Partialschwingung gleich der Periode der darzustellenden Funktion. Mittels einiger mathematischer Hilfssätze lassen sich nun die Koeffizienten der Fourier'schen Reihe, also die Amplituden der einzelnen Komponenten, ausrechnen.

Hierauf soll nicht näher eingegangen werden. Es genügt hier hinsichtlich der experimentellen Untersuchungen vorliegender Arbeit die Resultate zu diskutieren. Im vorliegenden Fall der ballistischen Erregung ist also die darzustellende Funktion

$$f(t) = C_1 e^{-\delta t} \cos \omega t + C_2 e^{-\delta t} \sin \omega t.$$

In seiner Theorie erhält Vos für das konstante Glied den Ausdruck:

$$a_0 = \frac{2 v_0}{\tau (\delta^2 + \omega^2)}.$$

Das bedeutet, daß die Membran zunächst einmal unter Einwirkung einer ununterbrochenen Impulsfolge, bei der jeder Impuls der Membran eine Geschwindigkeit v_0 erteilt, um eine Größe a_0 dauernd aus ihrer Ruhelage entfernt wird. Diese Verschiebung aus der Ruhelage ist direkt proportional v_0 und $\frac{1}{\tau}$, der Impulszahl, dagegen nimmt die Verschiebung ab mit zunehmender Eigenfrequenz und Dämpfung der Membran. Die Theorie ermöglicht nun weiterhin die Ausrechnung der Koeffizienten a_n und b_n, wo n die Ordnung des Obertones bezeichnet. Nun haben aber die zu a_n und b_n gehörigen Schwingungen dieselbe Periode, nur besitzen die Schwingungen gegeneinander eine Phasenverschiebung von $\frac{\pi}{2}$. Man kann so die Amplituden zusammengehöriger Schwingungen nach der Beziehung

$$i_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

zusammenfassen. Unter Berücksichtigung dieser Beziehung erhält Vos in seiner Theorie für die Amplitude eines Obertones folgenden Ausdruck:

$$= \frac{v_0}{\omega^2 \tau} \cdot \sqrt{\left[\frac{1 - \frac{\omega_0}{\omega} n}{d^2 + \left(1 - \frac{\omega_0}{\omega} n\right)^2} + \frac{1 + \frac{\omega_0}{\omega} n}{d^2 + \left(1 + \frac{\omega_0}{\omega} n\right)^2}\right]^2 + d^2 \left[\frac{1}{d^2 + \left(1 - \frac{\omega_0}{\omega} n\right)^2} - \frac{1}{d^2 + \left(1 + \frac{\omega_0}{\omega} n\right)^2}\right]^2}$$

Hierin bedeutet ω die Eigenfrequenz der Membran, n ist eine ganze Zahl und bedeutet die Ordnung des Obertones. Zur Abkürzung ist gesetzt: $\frac{2\pi}{\tau} = \omega_0$ und $\frac{\delta}{\omega} = d$.

Amplitudenverhältnis der Oberschwingungen einer ballistisch erregten Telephonmembran.

(vergl. Fig. 3 bis 7)

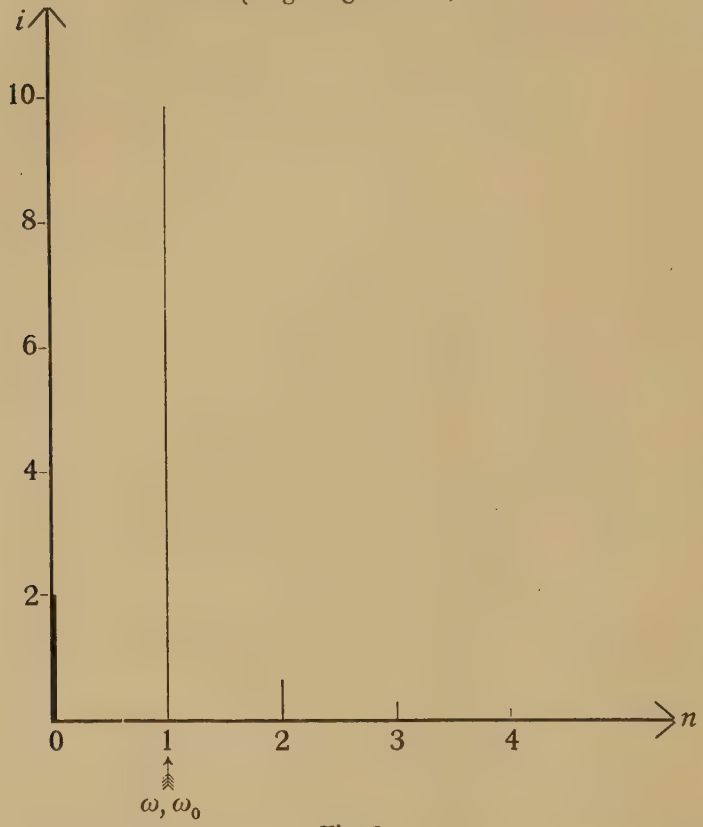

Fig. 3.

Zeit τ zwischen zwei Impulsen gleich der Eigenschwingungsdauer T der Telephonmembran.

Die Formel ist abgeleitet unter der Voraussetzung, daß τ ein ganzes Vielfaches von $\frac{T}{2}$ ist.

Die beigegebenen Figuren sollen die relative Größe der einzelnen Amplituden der Obertöne darstellen. Die Amplituden sind nach obiger Formel berechnet unter der Annahme, daß $d = 0{,}1$ ist ($d =$ cyklisches Dekrement). Abgetragen als Ordinaten sind dann die numerischen Werte des Wurzelausdrucks.

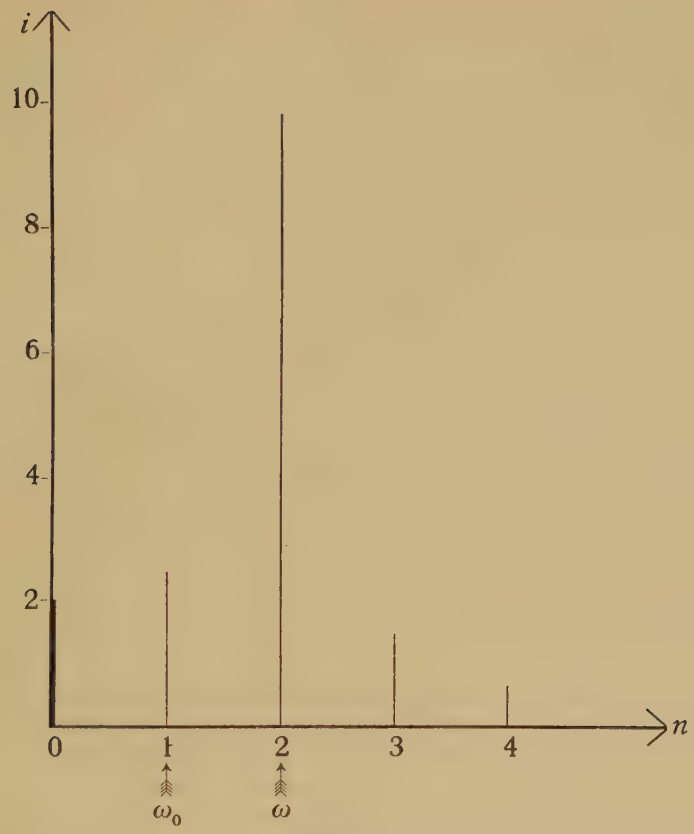

Fig. 4.
$\tau = 2\,T$

In Fig. 3 ist der Fall dargestellt, daß $\omega = \omega_0$, d. h. es ist die Impulsfolge derartig gewählt, daß $\tau = T$ ist. Man sieht, daß die Amplitude der ersten Partialschwingung, die die Frequenz des Grundtones hat und in diesem Falle mit der Eigenfrequenz der Membran übereinstimmt, am stärksten hervortritt, während die Amplituden der zweiten, dritten und vierten Partialschwingung schon erheblich schwächer sind. Fig. 4 stellt den Fall $\tau = 2\,T$ dar. Man erhält hier das eigenartige Resultat, daß die Amplitude der durch τ bestimmten Grundperiode bedeutend kleiner ist als die Amplitude der zweiten Partialschwingung, die in diesem Falle die Frequenz des Eigentones der Membran hat.

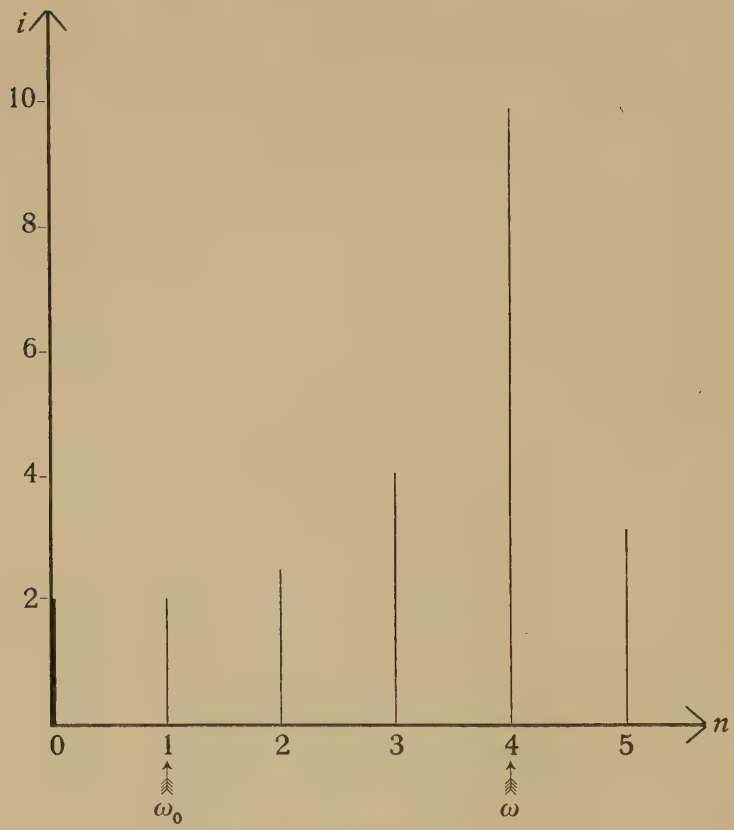

Fig. 5.
$\tau = 4\,T$

Fig. 5 stellt das Verhältnis der Amplituden der einzelnen Partialschwingungen im Falle $\tau = 4\,T$ dar. In Fig. 6 wird der Fall zur Anschauung gebracht, bei dem die Impulsfolge derartig gewählt ist, daß $\tau = 1{,}5\,T$ wird. Man sieht, daß der Eigenton der Membran überhaupt nicht im Klang enthalten ist, sondern nur der Grundton mit der Periode τ und höhere Partialtöne mit geringer Amplitude. Analoges würde sich im Falle $\tau = 2{,}5\,T$, $3{,}5\,T \ldots$ ergeben. Den Fall $\tau = 4{,}5\,T$ stellt Fig. 7 dar. Insgesamt ist zu den Figuren noch zu bemerken, daß immer nur die Amplituden ein und derselben Figur mit einander vergleichbar sind, da zum Vergleich der einzelnen Figuren unter-

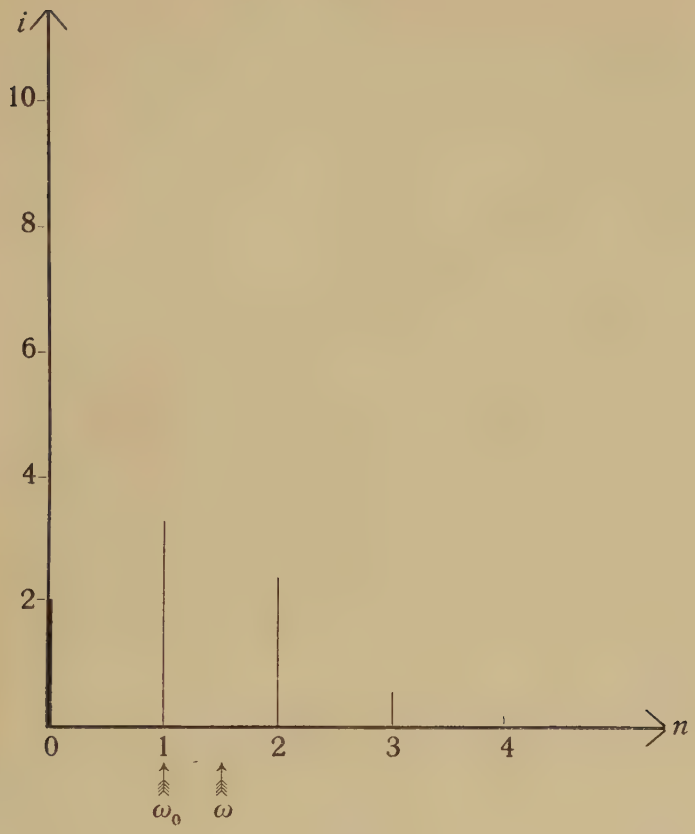

Fig. 6.
$\tau = 1{,}5\ T$

einander noch der multiplikative Faktor $\frac{v_0}{\omega^2 \tau}$ vor der Wurzel zu berücksichtigen wäre, der von τ abhängig ist. Nach dem zweiten Teil der Theorie hängt also das Auftreten hoher Obertöne und ferner das relative Verhältnis der Amplituden der einzelnen Obertöne in ganz bestimmter Weise von der Impulsfolge bezw. vom Verhältnis, in dem τ zum Eigenton der Membran steht, ab. Dieser Punkt, sowie die im ersten Teil der Theorie enthaltenen Verhältnisse werden von ausschlaggebender Bedeutung für die Empfindlichkeit des Telephons bei verschiedenen Impulszahlen sein. Im experimentellen Teil wird sich ergeben, daß

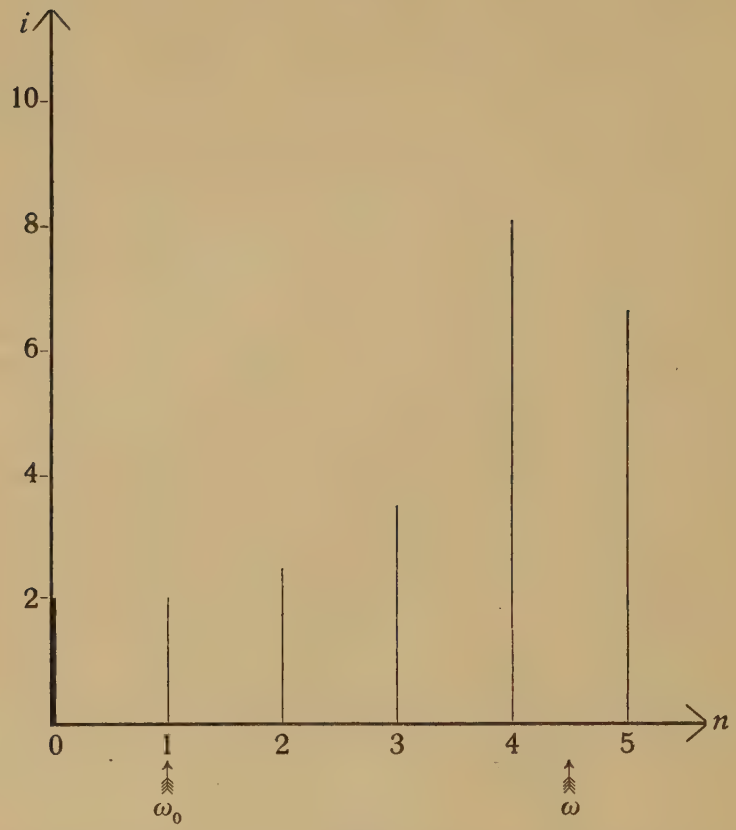

Fig. 7.

Amplitudenverhältnis der Oberschwingungen einer ballistisch erregten Telephonmembran. $\tau = 4{,}5\ T$.

gerade das Auftreten der hohen Obertöne großen Einfluß auf die Empfindlichkeit hat, da ja bei den Empfindlichkeitsmessungen ein dritter Umstand, der für die Empfindlichkeit sehr wichtig ist, hinzukommt, nämlich die verschiedene Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für verschiedene Tonhöhen, speziell die große Empfindlichkeit für hohe Töne. Doch auf diese Verhältnisse wird bei Besprechung der Empfindlichkeitsmessungen näher eingegangen werden.

Aus den theoretischen Erörterungen geht hervor, daß für die Empfindlichkeitsmessungen die Kenntnis der Eigenfrequenz

der Telephonmembran erforderlich ist. Es wurden daher zunächst die Eigentöne der Untersuchungstelephone bestimmt. Über Methode und Resultate dieser Untersuchung wird im nächsten Abschnitt berichtet.

III. Bestimmung der Eigentöne der untersuchten Telephone.

Zur Bestimmung der Eigentöne von Telephonen kommen zwei Methoden in Betracht. Beide Methoden wurden bereits von M. Wien[1]) in seiner Arbeit über die akustischen und elektrischen Konstanten des Telephons angewandt.

Wenn man vermittels einer Wechselstromsirene durch ein Telephon einen angenähert sinusförmigen Wechselstrom hindurchschickt, so macht die Telephonmembran im allgemeinen erzwungene Schwingungen von angenäherter Sinusform. Man wird also im Telephon einen Strom bekommen, dessen Schwingungszahl gleich der Frequenz des hineingeschickten Wechselstromes ist. Wenn man nun die Frequenz des Wechselstromes allmählich ändert, etwa von einer maximalen Frequenz an kontinuierlich immer langsamer werden läßt, so machen sich die Eigentöne der Telephonmembran in der Weise bemerkbar, daß dann, wenn die Frequenz des Wechselstromes mit der Tonhöhe des Eigentones übereinstimmt, infolge Resonanzwirkung eine Vergrößerung der Amplitude der Membran eintritt. Nach der Theorie[2]) erhält man für die Amplitude der elastischen Schwingung eines Massenpunktes mit der Eigenperiode n und der Dämpfung δ, wenn eine äußere Kraft von der Form $A \sin kt$ auf ihn wirkt, den Ausdruck

$$a = \frac{A}{\sqrt{(n^2 - k^2)^2 + 4\,\delta^2 k^2}}\,.$$

---

1) M. Wien, Die akustischen und elektrischen Konstanten des Telephons. Ann. d. Phys. Bd. 4, p. 450. 1901.

2) z. B. A. Kalähne, Grundzüge der mathem. phys. Akustik, p. 73. Leipzig 1910.

Man sieht, daß für $n = k$, wenn die Frequenz der äußeren Kraft in Resonanz ist mit der Eigenperiode n, a einen maximalen Wert bekommt. Man wird also immer dann, wenn die Frequenz des Wechselstromes mit der Höhe der Eigentöne übereinstimmt, maximale Tonintensität erhalten. Diese Maxima der Tonintensität kann man durch direktes Hören feststellen und hat nur die Frequenz des Wechselstromes zu bestimmen, bei der die Verstärkung der Tonintensität eintritt und hat damit die Tonhöhe des Eigentones.

Eine zweite Methode gründet sich auf die Feststellung der sogenannten Reizschwelle für die einzelnen Tonhöhen. Man erregt mittels der Wechselstromsirene das Telephon durch einen Sinusstrom von bestimmter Frequenz, schwächt dann durch Einschalten von Widerstand den Wechselstrom so lange, bis man einen noch gerade hörbaren Ton im Telephon bekommt und mißt den entsprechenden Minimalstrom. Wenn man nun die Minimalströme, die zur Erzeugung eines noch gerade hörbaren Tones nötig sind, bei verschiedenen Tonhöhen mißt, so wird sich zunächst der Einfluß der wechselnden Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für Töne verschiedener Tonhöhen in der Weise geltend machen, daß die Werte der Minimalströme mit wachsender Tonhöhe sehr stark abnehmen. Außerdem aber wird man in der Gegend der Eigentöne der Membran infolge der Resonanz, wie oben näher ausgeführt, besonders kleine Werte der Minimalströme erhalten. Wien hat die Eigentöne der von ihm untersuchten Telephone nach beiden Methoden festgestellt und übereinstimmende Resultate erhalten.

Für die im folgenden beschriebenen Messungen wurde die erste, bei weitem einfachere, dieser beiden Methoden gewählt.

Eine Wechselstromsirene in der von M. Wien angegebenen Konstruktion[1]) stand mir nicht zur Verfügung. Es wurde daher zur Erzeugung der Wechselströme folgende einfache Anordnung getroffen. Vor den Polen eines Elektromagneten G (vgl. Fig. 8) wird ein gezähntes Eisenrad R von 12 cm Durchmesser und 4 mm Dicke in Rotation gebracht. Die Entfernung

1) M. Wien, Über die Erzeugung und Messung von Sinusströmen. Phys. Ztschr. II, p. 245. 1900/1901.

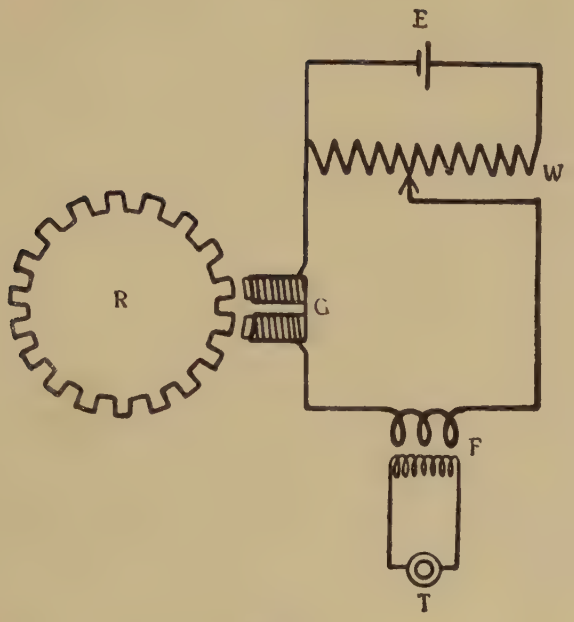

Fig. 8.
Versuchsanordnung zur Bestimmung der Eigenfrequenz einer Telephonmembran.

und Breite der Zähne ist so gewählt, daß in einem bestimmten Augenblicke sich vor den beiden Polen des Elektromagneten immer gleichzeitig zwei Zähne oder zwei Zahnlücken befinden. Zur Erregung des Elektromagneten wurde, wie die Fig. 8 zeigt, folgende Schaltung getroffen: Ein Akumulator *E* wurde durch einen Schiebewiderstand *W* von 24 Ohm geschlossen und von diesem Widerstand die zur Erregung des Elektromagneten nötige Spannung abgenommen. Wird nun bei erregtem Elektromagnet das Eisenrad in Rotation versetzt, so schwankt der magnetische Kraftfluß zwischen einem Maximum und Minimum. Denn wenn sich vor den Polen des Elektromagneten je zwei Zähne des Eisenrades befinden, so verlaufen die magnetischen Kraftlinien fast ganz innerhalb von Eisen, abgesehen von den schmalen Luftschlitzen zwischen Polen und Zähnen, wenn dagegen sich zwei Zahnlücken vor den Polen befinden, so müssen die magnetischen Kraftlinien einen großen Teil ihres Weges in Luft

zurücklegen. Im ersten Falle ist der magnetische Widerstand klein und der Kraftfluß im Maximum, im zweiten Falle der magnetische Widerstand groß und der Kraftfluß im Minimum. So kommt es, daß in den Spulen des Elektromagneten eine oszillatorische, elektromotorische Kraft induziert wird. Es überlagert sich auf diese Weise dem den Magneten erregenden Gleichstrom ein ungefähr sinusförmiger Wechselstrom, dessen Frequenz gleich dem Produkt aus der Anzahl der Zähne des Rades mal der sekundlichen Umdrehungszahl des Rades ist. In die Zuleitungen zum Elektromagneten war noch die Primärspule eines kleinen Transformators F — es war eine kleine Induktionsspule, wie sie in der Telephonie Verwendung findet — eingeschaltet, an dessen Sekundärspule das Telephon T lag, dessen Eigenton bestimmt werden sollte. Durch Einschalten des Transformators wurde erreicht, daß der den Elektromagneten erregende Gleichstrom keinen Einfluß auf das Telephon hatte, und nur der bei Rotation entstehende Wechselstrom dem Telephon zugeführt wurde.

Das gezähnte Eisenrad wurde nach Art einer Turbine durch Anblasen mittels komprimierter Kohlensäure in Rotation versetzt. Die Kohlensäure wurde einer käuflichen Bombe entnommen, deren Druck durch ein Reduzierventil zunächst reduziert wurde. An dem Reduzierventil war ein Druckschlauch befestigt, an dessen Ende eine konisch sich verjüngende Spitze angebracht war. Aus der Öffnung dieser Spitze von ungefähr 2 mm Durchmesser strömte die Kohlensäure in tangentialer Richtung gegen die Zähne des Rades und versetzte es so in Rotation. Wenn die mit dem Gasstrom einer Bombe erzielte Umdrehungsgeschwindigkeit nicht ausreichte, was meistens der Fall war, wurde das Rad noch an einer zweiten Stelle in gleicher Anordnung angetrieben. Es ließ sich auf diese Weise eine maximale Umdrehungsgeschwindigkeit von 90—100 p. Sek. erreichen. Da das Rad 30 Zähne besaß, bekam man so einen Wechselstrom von einer maximalen Frequenz von ungefähr 3000.

Es mußte nun noch eine Vorrichtung getroffen werden, die gestattete die Frequenz des Wechselstromes bezw. die Umdrehungszahl des Rades in einem beliebigen Augenblicke zu bestimmen. Zu diesem Zwecke wurde ein Chronograph benutzt.

An dem Chronographen lief, von einem Uhrwerk gezogen, mit ziemlich konstanter Geschwindigkeit ein Papierstreifen ab. An dem Apparat befanden sich drei Vorrichtungen, welche gestatteten, in voneinander unabhängiger Weise auf dem ablaufenden Papierstreifen Zeichen zu machen. Zwei von diesen Vorrichtungen waren ganz ähnlich eingerichtet, wie die Schreibvorrichtung eines Morseapparates. Dicht über den Polen eines Elektromagneten befand sich ein Anker, der an dem einen Ende eines Hebels befestigt war, während an dem anderen Ende des Hebels eine kleine Nadelspitze angebracht war. Wurde der Elektromagnet erregt, bewegte sich der Anker abwärts; so hob sich die Spitze in die Höhe und machte ein Zeichen auf dem ablaufenden Papierstreifen. Diese Vorrichtung war in doppelter Ausführung vorhanden. Außerdem befand sich an dem Apparat noch ein Hebel, der mit der Hand betätigt werden konnte, und an dessen einem Ende ebenfalls eine Nadelspitze angebracht war. Die Anordnung der drei Hebel war so getroffen, daß die drei Nadelspitzen dicht nebeneinander lagen, und so die Zeichen, die von den einzelnen Hebeln gemacht waren, in bestimmter Weise nebeneinander auf dem Papierstreifen zu liegen kamen.

An der Achse des gezähnten Eisenrades der Wechselstromsirene war nun ein Zählwerk angebracht. An dem Rade des Zählwerkes befand sich ein kleiner Vorsprung, der nach Ablauf von jedesmal 100 Umdrehungen zwei einen elektrischen Kontakt bildende Federn zusammendrückte. Dieser Kontakt schloß einen aus einem Akkumulator und dem einen Elektromagneten des Chronographen bestehenden Stromkreis. Beim Schließen des Kontaktes wurde dann jedesmal der Elektromagnet erregt und auf dem Papierstreifen ein Zeichen gemacht, wodurch der Ablauf von 100 Umdrehungen markiert wurde.

Der zweite Elektromagnet des Chronographen lag in einem Stromkreis, der pro Sekunde einmal von einem Sekundenpendel geschlossen wurde. Durch diesen Elektromagneten wurde so die Zeit auf dem Papierstreifen verzeichnet. Die dritte Vorrichtung des Chronographen wurde dazu benutzt, die Bereiche der verstärkten Tonintensität zu markieren, wie im folgenden Abschnitt näher beschrieben wird.

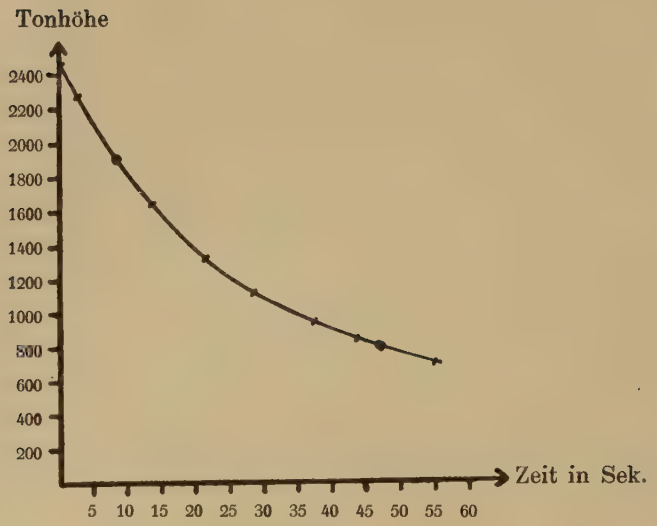

Fig. 9.
Kurve der auslaufenden Wechselstromsirene: Abhängigkeit der Tonhöhe von der Zeit.

Die Messungen wurden nun in der Weise durchgeführt, daß zunächst durch Antrieb mittels der komprimierten Kohlensäure das gezähnte Eisenrad auf maximale Tourenzahl gebracht wurde. Der Kohlensäurestrom wurde dann abgestellt, das Uhrwerk in Tätigkeit gesetzt, das den Papierstreifen abzog, und die beiden Vorrichtungen am Chronographen eingeschaltet, die zur Registrierung der Zeit nnd der Tourenzahl des Rades dienten. Das Rad der Wechselstromsirene begann so „auszulaufen", teils gedämpft durch Reibung an den Achsenlagern, teils durch Reibung an der Luft. Man erhielt auf diese Weise im Telephon einen von einer bestimmten Höhe an allmählich sinkenden Ton (vgl. Fig. 9). Jedesmal, wenn die Frequenz des Wechselstromes mit der Tonhöhe der Eigentöne übereinstimmte, trat ein Anschwellen der Tonintensität ein. Der Bereich des Anschwellens wurde nun mittels der von der Hand zu betätigenden Vorrichtung am Chronographen auf dem ablaufenden Papierstreifen markiert. Man hatte so auf dem Papierstreifen die zur Bestimmung der Eigentöne notwendigen Daten. Aus den Marken, die die Sekunden bezeichnen, konnte man sich die Geschwindig-

keit berechnen, mit der der Papierstreifen abgelaufen war. Daraus folgte dann die Zeit, die zwischen zwei Marken verstrichen war, die den Ablauf von 100 Umdrehungen der Wechselstromsirene anzeigten, und es ließ sich so die mittlere Tonhöhe der Sirene von Marke zu Marke bestimmen und eine Kurve aufstellen, die die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Zeit bei der auslaufenden Sirene darstellte. Aus den mittels Hand gemachten Zeichen ließ sich schließlich die Tonhöhe des Eigentones feststellen.

Tabelle II.

Eigentöne der Versuchstelephone.

1. Einfachtelephon von Siemens		2. Doppelkopftelephon von Siemens		3. Doppelkopftelephon von Seibt	
815		1145		890	
800		1155		910	
820	Mittelwert:	1135		890	Mittelwert:
815	816	1150	Mittelwert:	920	907
820		1150	1146	915	
825		1145		915	
		1145			
		1140			

Mit Rücksicht auf die späteren Messungen der Lautstärke in Abhängigkeit von der Impulszahl kam es vor allem darauf an, den Grundton der einzelnen Membranen zu bestimmen. Es ergab sich, wie aus Tabelle II näher zu ersehen ist, für das Siemens'sche Einfachtelephon: 816, für das Doppelkopftelephon von Siemens 1146, für das Doppelkopftelephon von Seibt 907 als Grundton der Membran. Bei dem Seibt'schen und Siemensschen Doppelkopftelephon beziehen sich die angegebenen Werte auf eine der beiden Membranen, die mit einem Zeichen versehen und auch zu den späteren Messungen benutzt wurde. Es hatte sich nämlich herausgestellt, daß der Eigenton der beiden Membranen nicht genau übereinstimmte, sondern die

beiden Maxima der Tonintensität etwas getrennt waren. Dadurch war es hinsichtlich der späteren Messungen erforderlich, eine Membran einzeln zu untersuchen.

Allgemein ist noch zu den Messungen zu bemerken, daß die Bereiche verstärkter Tonintensität ziemlich breit waren — wie auch schon Wien l. c. erwähnt —, d. h. sich über einen Bereich von manchmal 100 Schwingungen erstreckten. Aber trotzdem konnte man, namentlich wenn man den erregenden Strom im Elektromagneten etwas verstärkte, einen kleinen Bereich markieren, in dem ein besonders starkes Aufgellen der Tonintensität eintrat.

Die Versuchanordnung gestattete auch noch den nächst höheren Eigenton der Telephone zu bestimmen. Es ergaben sich für diesen Eigenton als Werte: Siemens' Einfachtelephon ca. 1910, Siemens' Doppelkopftelephon ca. 2540 und Seibt's Doppelkopftelephon ca. 2200. Jedoch kam dieser Eigenton für die späteren Messungen nicht in Betracht. Im Vergleich zum Grundton ist dieser Eigenton sehr schwach ausgeprägt. Er hat einen harten, metallischen Klang. Ferner ließ sich bei allen drei Telephonen konstatieren, daß bei diesem Eigenton mehrere, meist zwei, Maxima nebeneinander lagen. Diese Eigentümlichkeit wurde ebenfalls schon von M. Wien[1]) konstatiert.

IV. Empfindlichkeitsmessungen bei ballistischer Erregung.

1. Methode der Untersuchung.

Den in der Einleitung erwähnten Messungen über die Empfindlichkeit des Telephons bei sinusförmigem Wechselstrom von Wien, Rayleigh und Austin liegt, wie schon erwähnt, die Methode der sogenannten Reizschwelle zu Grunde. Die Methode beruht darauf, daß man den Minimalreiz feststellt, der dazu nötig ist, im Ohr eine noch gerade merkliche Empfindung hervorzurufen. Ein Maß für den Minimalreiz ist beim Telephon

---

1) M. Wien, Die akustischen und elektrischen Konstanten des Telephons, Ann. d. Physik Bd. IV, p. 450. 1901.

der Strom, der zur Erzeugung des Minimalreizes notwendig ist. Je kleiner der Strom, der zur Erzeugung eines gerade noch hörbaren Tones notwendig ist, desto größer ist die Empfindlichkeit bei der betreffenden Tonhöhe. Eine der Methode der Reizschwelle ganz ähnliche Methode wird häufig in der Praxis der drahtlosen Telegraphie[1]) angewandt und liegt auch den Empfindlichkeitsmessungen vorliegender Arbeit zu Grunde. Es wurde in die Zuleitung zum Telephon eine automatische Unterbrechungsvorrichtung U_2 in Fig. 10 (Beschreibung befindet sich im nächsten Abschnitt) eingeschaltet, die den pulsierenden Gleichstrom derartig unterbrach, daß man im Telephon länger und kürzer andauernde Töne bekam, also „Striche" und „Punkte" hörte, so, wie man sie bei der Aufnahme von Telegrammen in der Radiotelegraphie erhält. Als Maß für die Empfindlichkeit hat man dann die Stärke des pulsierenden Gleichstroms, der dazu nötig ist, um im Telephon die Töne mit einer derartigen Intensität zu erregen, daß man gerade noch die Striche von den Punkten unterscheiden kann, also praktisch gesprochen noch gerade ein Telegramm aufnehmen kann. Es ist nun empirisch festgestellt worden[2]), daß die Stromstärke, die erforderlich ist, um die Striche von den Punkten zu unterscheiden, ungefähr 5 mal so groß ist als die zur Erzeugung des Minimalreizes der Reizschwelle notwendige Stromstärke. Hierin liegt ein Vorteil, da auf diese Weise die Stromstärke der Ströme, die man zu messen hat, größer wird. Man erhält nämlich bei der Methode der Reizschwelle nur Ströme, die selbst bei den empfindlichsten Instrumenten noch an der Grenze der Meßbarkeit liegen. Zur Methode der Strommessung ist noch allgemein folgendes zu bemerken: Wenn man den pulsierenden Gleichstrom soweit geschwächt hat (Näheres hierüber siehe im Abschnitt IV, 3), daß die eben definierte Grenze erreicht ist, stellt man die automatische Unterbrechungsvorrichtung ab und mißt den Galvanometerausschlag, der einer andauernden Folge von Gleichstromimpulsen entspricht. Da die einzelnen Gleichstromstöße sehr rasch aufeinander folgen, stellt sich der Galvanometerausschlag

1) z. B. von L. W. Austin, Phys. Ztschr. Bd. 5, p. 1131. 1911.

2) L. W. Austin, l. c.

ruhig ein. Das Galvanometer gibt somit den Mittelwert des Stromes an. Die Stromstärken J, die man nach dieser Methode erhält, sind nun ein Maß für die Empfindlichkeit bei einer bestimmten Impulszahl, und, wenn man die Werte $i = \frac{1}{J}$ betrachtet, wie dies bei der Ausführung der Messungen (Abschnitt IV, 3) geschieht, so hat man Größen, die der Empfindlichkeit proportional sind.

Im folgenden Abschnitt wird die Beschreibung der Apparatur gegeben, die entsprechend der Aufgabe die Bedingung zu erfüllen hatte, die in der drahtlosen Telegraphie vorliegenden Verhältnisse für die Erregung des Telephons nachzubilden.

IV, 2. Beschreibung der Apparatur zu den Empfindlichkeitsmessungen.

Die Apparatur zur Bestimmung der Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Impulszahl setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Der erste Teil besteht aus dem Schwingungskreis I (vgl. Fig. 10) und einem Stromkreis mit einem Unterbrecher U_1, der zur Erregung der Schwingungen dient. Dieser Teil ist zu vergleichen mit der Sendestation. Der zweite Teil besteht aus einem Schwingungskreis II mit aperiodischem Detektorkreis und Telephon, ist also einer Empfangsstation nachgebildet.

Es soll zunächst der erste Teil der Apparatur beschrieben werden. Der Schwingungskreis I bestand aus einer Selbstinduktionsspule L_1 und einer Kapazität C_1, die, wie in der Fig. 10 ersichtlich, zu einem Schwingungskreis zusammengeschaltet waren. Die Selbstinduktion bestand aus einer Spule von blankem Kupferdraht, der auf einen mit Rillen versehenen Porzellanzylinder aufgewickelt war. Die eingeschaltete Selbstinduktion wurde berechnet[1]) zu 15384 cm. C_1 war ein Zinkplattenkondensator mit Luft als Dielektrikum. Er bestand aus

---

1) nach von G. Glage zusammengestellten Formeln und Tabellen. Jahrbuch für drahtlose Telegraphie u. Telephonie Bd. 2, p. 504. 1908.

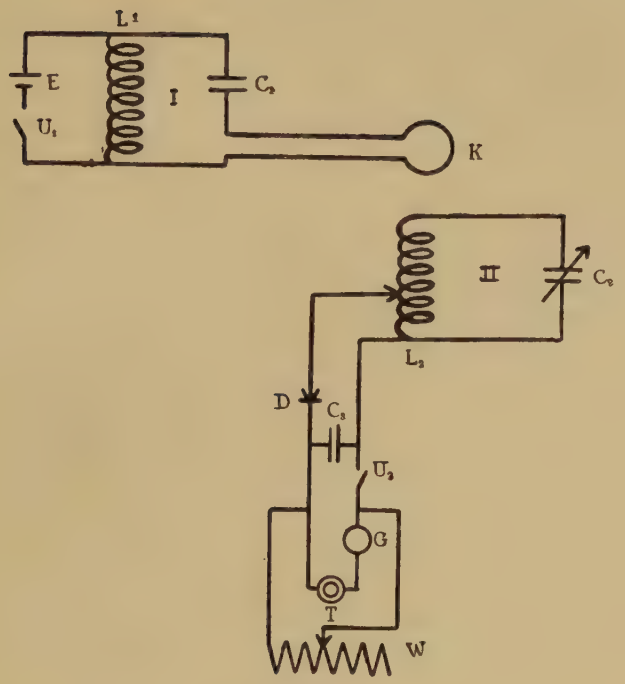

Fig. 10.

Versuchsanordnung zur Messung der Empfindlichkeit einer ballistisch erregten Telephonmembran.

5 Platten von 40 mal 40 cm Größe. Die Dicke der Luftschicht betrug 0,1 cm. Der Kondensator hatte so eine Kapazität von 5040 cm. Nach der Thomsonschen Formel $T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$ bekommt man so im Schwingungskreis I eine Wellenlänge von ungefähr 545 m. Ferner lag noch im Kreise I ein Koppelungsring K von wenigen Windungen Draht, die zu einem Ring von 8 cm Durchmesser zusammengelegt waren. Mit Hilfe dieses Ringes wurde die Koppelung zwischen den beiden Schwingungskreisen hergestellt. Zur Erregung der Schwingung wurde eine Methode gewählt, wie sie bei sogenannten Stationsprüfern üblich ist. Die entsprechende Schaltung wurde von Eichhorn[1]) angegeben.

1) G. Eichhorn, D. R. P. 15756 (1903); vgl. auch „Die Naturwissenschaften“ Bd. 1, p. 99. 1913.

Die Schaltung ist prinzipiell folgende: An die Enden der Selbstinduktionsspule L_1 des Schwingungskreises, in dem die Schwingungen entstehen sollen, ist ein Stromkreis aus einem Akkumulator E und einem Saitenunterbrecher U_1 angeschlossen. Durch die Spule L_1 fließt nun ein Gleichstrom, solange der Stromkreis bei U_1 geschlossen ist. Wird der Stromkreis bei U_1 geöffnet, so entsteht ein dem ursprünglichen Strom gleichgerichteter Extrastrom, der den Kondensator C_1 auflädt. Der Kondensator wird sich dann im nächsten Augenblick oscillatorisch durch den Schwingungskreis entladen mit einer Schwingungsdauer, die nach der Thomson'schen Schwingungsformel $T = 2\pi\sqrt{C \cdot L}$ durch die Kapazität und Selbstinduktion des Kreises gegeben ist, und zwar wird die entstehende Schwingung äußerst schwach gedämpft sein, da eine Funkenstrecke, die bekanntlich an der Dämpfung den größten Anteil hat, nicht im Schwingungskreis enthalten ist, und so als Ursachen der Dämpfung nur der Energieverlust durch Wirbelströme, die das magnetische Feld des Stromes in benachbarten Leitern induziert, der Verlust durch dielektrische Hysterese im Kondensator und etwa der Energieverlust durch Wärmeentwicklung in der Strombahn in Betracht kommt.

Eine wesentliche Bedingung für das Funktionieren dieser Anordnung besteht darin, daß die Unterbrechung am Unterbrecher U_1 vollkommen funkenfrei vor sich gehen muß. Ist das der Fall, so wird bei der Unterbrechung der Stromkreis Akkumulator-Unterbrecher abgeschaltet, und der Extrastrom hat nun die Möglichkeit, den Kondensator aufzuladen. Entsteht dagegen bei der Unterbrechung ein Funke, so hat der Extrastrom der Spule L_1 auch die Möglichkeit, den Weg durch den Funken hindurch zu wählen. Wenn man z. B. einen elektromagnetisch getriebenen Saitenunterbrecher in der üblichen Schaltung benutzt, so entsteht, auch dann, wenn man den Strom in diesem Stromkreis sehr schwach nimmt, im Elektromagneten des Unterbrechers ein Extrastrom, der an der Unterbrechungsstelle einen Funken hervorruft, und so dem Extrastrom von L_1 die Möglichkeit gibt, sich auch auf diesem Wege auszugleichen, sodaß der Kondensator nur unvollständig aufgeladen wird. Aber selbst bei Entladung des partiell aufgeladenen Kondensators

findet keine Schwingung infolge des durch den Funken entstehenden Kurzschlusses statt. Man muß deshalb eine besondere Schaltung anwenden, um diesen Übelstand zu vermeiden. Die diesbezügliche Schaltung wird weiter unten angegeben. Es soll jetzt zunächst eine Beschreibung des verwandten Unterbrechers gegeben werden.

Es wurde ein elektromagnetisch angetriebener Saitenunterbrecher benutzt. Ein derartig betriebener Saitenunterbrecher wurde zum ersten Male von M. Wien[1]) angewandt. Er funktioniert prinzipiell in der Weise, daß eine Stahlsaite als Anker zu einem Elektromagneten dient. Die Stahlsaite wird von dem Elektromagneten angezogen und öffnet dann mittels eines an ihr befestigten Kontaktes den den Elektromagneten erregenden Stromkreis, worauf die Saite wieder zurückschwingt und von neuem den Stromkreis schließt.

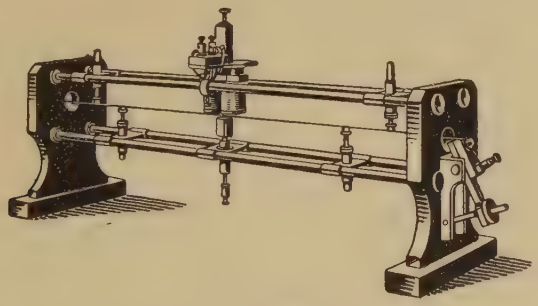

Fig. 11. Saitenunterbrecher.

Der Unterbrecher wurde ausgeführt vom Mechaniker Schmidt in Gießen. Einige konstruktive Einzelheiten sind der Beschreibung eines von Orlich[2]) angegebenen Saitenunterbrechers entnommen. Die einzelnen Bestandteile des Unterbrechers waren auf ein stabiles Gestell aufmontiert, das aus vier parallelen Messingstangen bestand, deren Enden in zwei seitlichen Holzgestellen befestigt waren. Die Anordnung der Messingstangen ist im Einzelnen aus der Abbildung Fig. 11 zu entnehmen. Auf den unteren Messingstangen ist ein Quecksilbernäpfchen befestigt

1) M. Wien, Ann. d. Phys. Bd. 44, p. 683. 1891.
2) Zeitschrift für Instrumentenkunde Bd. XXIV, p. 126. 1904.

und zwei Stege, mit denen die schwingende Saite abgegrenzt werden kann. An den oberen Messingstangen sind noch zwei weitere Stege angebracht, die den Zweck haben, die nicht schwingenden Teile der Saite nach unten zu drücken, sodaß die Saite fest auf die abgrenzenden Stege aufliegt. Ferner ist auf den oberen Stangen der Elektromagnet befestigt. Derselbe ist gewickelt aus 0,5 mm dickem Draht. Die beiden Spulen sind 3 cm hoch und haben einen Durchmesser von 2,5 cm. Der Elektromagnet ist so angeordnet, daß die Polschuhe sich dicht über der Saite befinden, die so den Anker zum Elektromagneten bildet. Die Saite, in deren Mitte ein Platinkontakt angelötet wurde, der den Kontakt mit dem Quecksilbernapf vermittelt, ist zwischen zwei Spannvorrichtungen ausgespannt, die an den seitlichen Holzwänden befestigt sind. Die Spannvorrichtung besteht, wie die Abbildung zeigt, aus einem Hebel, und zwar ruht die Saite auf einem Kreisbogen, dessen Mittelpunkt im Drehpunkt des Hebels liegt, sodaß die Saite beim Anspannen, was durch Anziehen der Schrauben am Hebel erfolgt, immer in derselben Höhe bleibt. Es ist noch zu erwähnen, daß Stege, Quecksilbernäpfchen und Elektromagnet so angeordnet sind, daß man sie in horizontaler Richtung auf den Messingstangen verschieben kann. Ferner war noch an jedem einzelnen Bestandteile eine Vorrichtung angebracht, die gestattete, den einzelnen Bestandteil in vertikaler Richtung zu heben und zu senken. So konnte man z. B. den Elektromagneten der Saite beliebig nähern und das Quecksilbernäpfchen beliebig heben und senken, um die Oberfläche des Quecksilbers in geeignete Berührung mit dem Platinstift zu bringen. Die stromführenden Teile sind sämtlich isoliert. Die Schaltung ist die übliche Unterbrecherschaltung, wie auch näher in der Fig. 12A zu sehen ist. Der Unterbrecher gestattet die Unterbrechungszahl in weiten Grenzen zu verändern, einmal durch Anspannen der Saite und dann durch Abgrenzen des schwingenden Teiles der Saite. So kann man bequem bei ein und derselben Saitendicke die Tonhöhe zwischen 50 und 900 verändern. Eine Bedingung für gutes Funktionieren ist sehr reines, von Staubfäden freies Quecksilber. Zum Betrieb des Unterbrechers genügt ein einziger Akkumulator. Eine große Annehmlichkeit des Unterbrechers besteht darin,

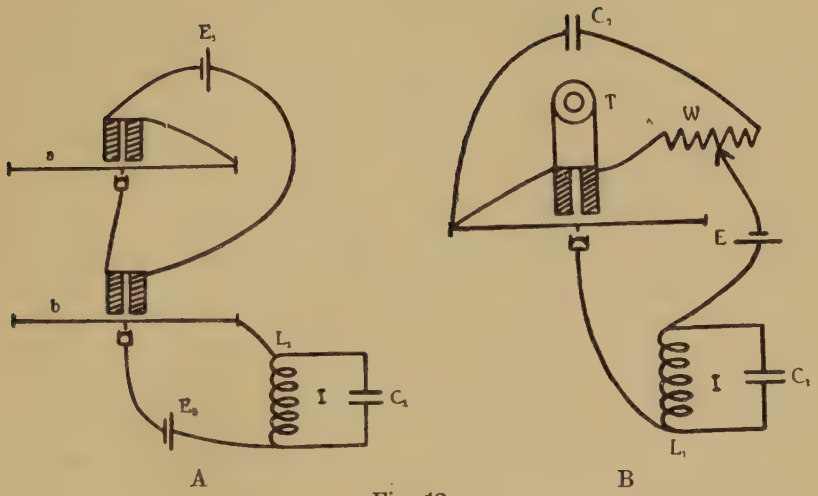

Fig. 12.

Schaltungsschemata zur Erzielung einer funkenfreien Stromunterbrechung am Saitenunterbrecher.

daß man die Unterbrechungszahl verändern kann, ohne daß der Unterbrecher aussetzt.

Man pflegt nun die oben erwähnte Störung der Funkenbildung in der Weise zu umgehen, daß man zwei Unterbrecher in folgender Schaltung anwendet (vgl. Fig. 12A). Man schickt den durch den Unterbrecher a in der üblichen Weise unterbrochenen Strom in den Elektromagneten des Unterbrechers b; wenn man jetzt die Saite des Unterbrechers b auf die Tonhöhe der Saite des Unterbrechers a abstimmt, gerät die Saite des Unterbrechers b in Schwingungen und betätigt den Kontakt der Unterbrechungsstelle. Durch diesen Kontakt kann man dann einen Stromkreis öffnen und schließen lassen, der, wie Fig. 12 zeigt, nur aus einem Akkumulator E_2, einem Teil der Saite und der Selbstinduktionsspule L_1 des Schwingungskreises I besteht. Man sieht, auf diese Weise ist es erreicht, daß in dem periodisch geöffneten und geschlossenen Kreise keine andere Selbstinduktion liegt, als die der Spule L_1. Da diese Selbstinduktion sehr klein ist im Vergleich zur Selbstinduktion der Spulen des Elektromagneten, die in den Stromkreis des Unterbrechers a eingeschaltet sind, bekommt man völlig funkenfreie Unterbrechungen,

sodaß der Extrastrom von L_1 nur den Kondensator aufladen kann. Diese Schaltung hat aber den Übelstand, daß die Schwingungen der Saite b sehr leicht aussetzen, namentlich bei großen Unterbrechungszahlen. Die Resonanz zwischen a und b muß nämlich sehr scharf sein; sowie sich bei längerer Beanspruchung die Saiten von a oder b auch nur ganz minimal ausdehnen, setzen die Schwingungen aus. Ferner ist es, wenn man, wie dies bei den Messungen notwendig war, die Tonhöhe fortwährend variieren muß, sehr langwierig, jedesmal auf Resonanz einzustellen. Es wurde ursprünglich nach dieser Schaltung gemessen, inzwischen jedoch gab M. Vos für den Stationsprüfer der Marburger Station eine neue Schaltung an, die sehr einfach und leicht zu betätigen ist (vgl. Fig. 12B). Das Neue an dieser Schaltung besteht darin, daß eine große Kapazität (2 M. F.) parallel zu Elektromagnet, Widerstand und eventuell auch Stromquelle gelegt wird. Auf diese Weise wird der störende Extrastrom durch die Kapazität C_2 aufgefangen, und es entsteht kein Funke an der Unterbrechungsstelle. Der Kondensator von 2 M. F. entlädt sich dann mit sehr großer Wellenlänge durch den Kreis Akkumulator, Widerstand, Spule des Elektromagneten, ohne dabei die viel kürzeren Schwingungen in Schwingungskreis I zu stören. Zum Betrieb des Unterbrechers wurde ein Akkumulator E in der aus der Figur ersichtlichen Schaltung benutzt, ferner war in den Stromkreis des Unterbrechers noch ein Widerstand W von ca. 12 Ohm eingeschaltet. Der Betrieb des Unterbrechers geschieht also unter äußerst minimalem Stromverbrauch.

Bei jeder Unterbrechung tritt also nun ein Wellenzug im Schwingungskreis I auf, und mit Hilfe des Unterbrechers ist es so möglich, die Anzahl der Wellenzüge pro Sekunde in weiten Grenzen zu verändern. Es handelt sich nun noch darum, die Anzahl der Wellenzüge in der Sekunde bezw. die Tonhöhe der Saite festzustellen. Zu diesem Zwecke wurde parallel zum Elektromagneten des Unterbrechers ein Telephon T geschaltet (vgl. Fig. 12B). Das Telephon bekommt dann bei jeder Unterbrechung einen Impuls, und der Ton im Telephon stimmt so mit der Tonhöhe der Saite überein. Die Tonhöhe des Telephones wurde nach der Quincke'schen Resonanzmethode ge-

messen. Ein vertikal aufgestelltes Glasrohr, das 4 cm Durchmesser besaß und 1,50 m lang war, wurde am unteren Ende durch einen Korkstopfen geschlossen, durch den hindurch zwei Glasröhren gingen. Das eine Rohr war mit der Wasserleitung in Verbindung, durch das andere Rohr konnte das Wasser wieder abgelassen werden. Am oberen Ende des Rohres war das Telephon so befestigt, daß die Membran parallel zum Wasserspiegel lag. Wenn man nun, wenn das Telephon tönte, allmählich Wasser zufließen ließ, hob sich langsam der Wasserspiegel, und es traten Maxima der Tonstärke auf, die im ganzen Zimmer laut zu hören waren. An einer neben dem Rohre angebrachten Skala konnte man die halben Wellenlängen ablesen und die Tonhöhe nach der bekannten Formel $v = \nu \cdot \lambda$ berechnen, worin v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, ν die Schwingungszahl und λ die Wellenlänge bedeutet.

Wir gehen jetzt zur Besprechung des zweiten Teiles der Apparatur über (vgl. Fig. 10). Durch den Koppelungsring K war der Schwingungskreis II sehr lose mit Schwingungskreis I gekoppelt, Kreis II bestand aus einem Drehkondensator C_2 (Maximum der Kapazität ca. 2000 cm) und einer Selbstinduktionsspule L_2. L_2 war auf einen Holzkern gewickelt; die Spule war 12,8 cm lang und hatte 72 Windungen und einen Durchmesser von 6 cm. Die Selbstinduktion betrug so[1]) 115084 cm. Oberhalb der Spule L_1 befand sich der Koppelungsring K, der die Schwingungen auf den Schwingungskreis II übertrug. Die Amplitude der Schwingung in II wird dann ein Maximum, wenn Resonanz besteht zwischen II und I. Dies kann man erreichen durch Veränderung der Kapazität des Drehkondensators. Diese Kapazität ist so zu wählen, daß sich für den Schwingungskreis II nach der Thomson'schen Schwingungsformel dieselbe Schwingungsdauer ergibt, wie in I.

An die Spule L_2 ist noch durch wenige Windungen der aperiodische Detektorkreis direkt angekoppelt. Er besteht aus einem Bleiglanzgraphitdetektor D, einem Blockkondensator C_3

---

1) berechnet nach von G. Glage zusammengestellten Formeln und Tabellen, Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie II, p. 504. 1908.

von 1000 cm Kapazität; parallel zum Blockkondensator liege zunächst nur das Telephon T (die weitere, bei den eigentlichen Messungen benutzte Schaltung weiter unten). Der Detektor war in der Werkstatt des Instituts hergestellt. Es war eine einfache Ausführung, sodaß es sich erübrigt, näher darauf einzugehen. Durch den leichten Druck einer Feder wurde eine Graphitspitze von 3 cm Länge, sowie man sie als Bleistifteinlage käuflich erhält, gegen ein Stückchen Bleiglanz gedrückt. Das Bleiglanzstückchen war auf Messing aufgelötet, an dem eine Kontaktschraube angebracht war. Die zweite Kontaktschraube war an der Feder befestigt. Das Ganze war auf ein Hartgummigestell aufmontiert.

Wie schon in der Einleitung näher ausgeführt, werden die Wellenzüge in dem aperiodischen Detektorkreis in pulsierenden Gleichstrom verwandelt, und man hört im Telephon einen Ton, dessen Tonhöhe mit der Unterbrechungszahl des Unterbrechers übereinstimmt. Daß die oben erwähnte Resonanz zwischen Schwingungskreis I und II vorhanden ist, kann man in dieser Anordnung sehr leicht feststellen. Man wird nur bei einer ganz bestimmten Stellung des Drehkondensators im Telephon einen Ton bekommen, und zwar dann, wenn die beiden Schwingungskreise aufeinander abgestimmt sind. Der Bereich des Drehkondensators, in dem der Ton zu hören ist, ist infolge der durch die lose Koppelung zwischen I und II bedingten Schärfe der Resonanz sehr klein, bei einer minimalen Verstellung des Drehkondensators verschwindet der Ton im Telephon wieder. Es wurde auf maximale Lautstärke eingestellt, und der Drehkondensator wurde dann in der entsprechenden Stellung gelassen.

Bei der Ausführung der Lautstärkemessungen war die Schaltung vom Blockkondensator an noch etwas anders. Bevor der pulsierende Gleichstrom ins Telephon kam, wurde er durch ein Galvanometer geschickt. Das Galvanometer war ein hochempfindliches Drehspulengalvanometer von Siemens und Halske. Die Empfindlichkeit des Galvanometers betrug bei einem Skalenabstand von 4,30 m ungefähr $1{,}5 \cdot 10^{-10}$. Abgelesen wurde mit Skala und Fernrohr. Ferner lag noch parallel zum Tele-

phon und Galvanometer ein Widerstandskasten, um den Ton im Telephon regulieren bezw. schwächen zu können. Wenn aller Widerstand eingeschaltet ist, wird infolge der Stromverzweigung der Ton im Telephon sehr stark, und desto schwächer, je mehr Widerstand man ausschaltet. Versuchstelephon und Widerstandskasten lagen, um Störungen durch die Töne des Saitenunterbrechers zu vermeiden, im Nebenzimmer. Es war nun schließlich noch, wie bereits oben erwähnt wurde, bei U_2 eine sehr einfache Vorrichtung getroffen, um den pulsierenden Gleichstrom zu unterbrechen. Der Kontakt wurde automatisch längere und kürzere Zeit geschlossen, sodaß man im Telephon „Striche" und „Punkte" hörte, also genau die in der drahtlosen Telegraphie bei Hörempfang vorliegenden Verhältnisse hatte. Die Unterbrechung geschah in der Weise, daß von einem Rade, an dessen Peripherie längere und kürzere Vorsprünge waren, eine den Kontakt vermittelnde Feder in ein Quecksilbernäpfchen getaucht wurde. Das Rad wurde getrieben durch einen kleinen Motor, dessen Umdrehungsgeschwindigkeit so mittels Seilscheiben reduziert wurde, daß das Rad gerade die Geschwindigkeit hatte, die dazu nötig war, um die Zeichen mit der in der Praxis üblichen Schnelligkeit zu geben.

IV, 3. Ausführung der Messungen.

Die Empfindlichkeitsmessungen wurden entsprechend der bereits beschriebenen Methode derartig ausgeführt, daß für verschiedene Impulszahlen die Minimalströme festgestellt wurden, die gerade dazu nötig sind, um Striche von den Punkten unterscheiden zu können. Im Einzelnen geschah dies derartig, daß durch Ausschalten von Widerstand am Widerstandskasten W (vgl. Fig. 10) die Töne im Telephon allmählich geschwächt wurden, so lange, bis man die „Striche" von den „Punkten" nicht mehr unterscheiden konnte. Darauf wurde der Unterbrecher U_2 abgestellt, und der Ausschlag des Galvanometers abgelesen, der dem Minimalstrom entsprach. Diese Messungen wurden nun bei verschiedenen Impulszahlen ausgeführt. Für

die Auswahl der einzelnen Impulszahlen waren die Ergebnisse der Theorie maßgebend. Um den Anschluss an die Theorie zu bekommen, wurden die Impulszahlen derartig gewählt, daß entweder die Zeit zwischen zwei Impulsen gleich der Eigenschwingungsdauer T der Telephonmembran bezw. einem ganzen Vielfachen derselben war, oder daß die Zeit τ den Beziehungen $\tau = \frac{3T}{2}, \frac{5T}{2} \ldots$ entsprach. Da die Eigenschwingungsdauer der einzelnen Telephonmembranen (vgl. Abschnitt III) bekannt war, ließen sich die den einzelnen Bedingungen entsprechenden Impulszahlen leicht ausrechnen, und dann konnte der Saitenunterbrecher auf diese Impulszahl bezw. Tonhöhe mit Hilfe der Vorrichtung zur Messung der Tonhöhe nach der Quincke'schen Resonanzmethode, die im Abschnitt IV, 2 näher beschrieben ist, eingestellt werden.

Da die Methode der Messungen voraussetzt, daß die Empfindlichkeit des Ohres während einer Meßreihe nicht wechselt, konnte natürlich nur bei vollkommener Ruhe gemessen werden. Jedes äußere Geräusch würde die Empfindlichkeit des Ohres beeinflussen. Die Messungen wurden daher nur in späten Abendstunden ausgeführt. Die im Folgenden angegebenen Messungen beziehen sich auf das rechte Ohr des Beobachters, das linke Ohr wurde immer mit sogenanntem „Antiphon", das aus einem in eine Gummihülle eingeschlossenen Wattepfropf bestand, verstopft. Es war so das Mögliche getan, um die Empfindlichkeit des Ohres innerhalb einer Meßreihe konstant zu halten. Nicht unerwähnt soll schließlich ein Umstand bleiben, der mit Rücksicht auf die Konstanz der Empfindlichkeit zu beachten war. Es hatte sich nämlich herausgestellt, daß eine Erwärmung des Telephons, die beim Anlegen an den Kopf eintrat, den Wert der Minimalströme beeinflußt. Das Siemens'sche Telephon war frei von diesen Störungen, nicht dagegen die beiden Doppelkopftelephone. Die Störungen bestanden im Einzelnen darin, daß bei einer bestimmten Tonhöhe die Empfindlichkeit, gemessen sofort nach Anlegen des Telephones an den Kopf, größer war, als nach einer Zeit von einigen Minuten. Dies wird wohl seinen Grund darin haben, daß infolge der Erwärmung die Membran sich etwas durchbiegt und sich von

dem Magneten des Telephons entfernt. Es ist klar, daß sich schon ganz minimale Durchbiegungen bemerkbar machen werden. Daß diese Störungen beim Siemens'schen Einfachtelephon nicht auftraten, dürfte seinen Grund in der größeren Dicke der Membran und in der anders ausgeführten Konstruktion des Gehäuses haben. Infolge der stärkeren Wandung, die das Siemens'sche Einfachtelephon hatte, kam die Membran nicht so nahe ans Ohr, wie die Membran der Doppelkopftelephone. Diese Störung ließ sich, nachdem sie einmal festgestellt war, leicht in der Weise umgehen, daß bei jeder einzelnen Messung immer so lange gewartet wurde, bis das Telephon sich erwärmt hatte. Nach Ablauf von einigen Minuten war dann eine Änderung der Einstellung nicht mehr zu konstatieren.

IV, 4. Resultate der Messungen und Besprechung derselben.

Die beigegebenen Kurven und Tabellen stellen die Resultate der Empfindlichkeitsmessungen dar. In den Kurven ist als Abszisse τ, die Zeit zwischen zwei Impulsen, als Vielfaches der Eigenschwingungsdauer T der Telephonmembran abgetragen. Als Ordinate ist $i = \frac{1}{J}$ abgetragen, worin J der Minimalstrom ausgedrückt in den am Galvanometer abgelesenen Skalenteilen (mm) ist. Die in diesem Abschnitt angeführten Messungen beziehen sich auf einen Blockkondensator von 1000 cm Kapazität. Diese Größe des Blockkondensators entspricht der in der Praxis der Radiotelegraphie gebräuchlichen. Einige Empfindlichkeitsmessungen bei größerem Blockkondensator sind im Anhang besprochen.

Von dem Siemens'schen Einfachtelephon liegen vier Meßreihen bei, deren Ergebnisse in Tabelle III zusammengestellt sind. Graphisch aufgezeichnet ist die Meßreihe 1 in Fig. 13. Der tiefste und zugleich am stärksten ausgeprägte Eigenton dieses Telephones lag, wie im Abschnitt III festgestellt wurde,

Tabelle III.

Empfindlichkeitsmessungen am Einfachtelephon von Siemens.

1.

Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
18	55.5	1.0 T
119	8.4	1.39
175	5.7	1.68
20	50	2.0
89	11.3	2.16
84	11.9	2.7
27	37	2.98
121	8.2	3.4
40	25	3.9
62	16.1	4.6

2.

Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
19	52.6	1.0 T
146	6.9	1.4
119	8.4	1.7
20	50	2.0
77	12.9	2.7
24	41.6	2.99
122	8.1	3.45
32	31.2	3.9
59	16.9	4.6

3.

Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
22	45.4	1.0 T
161	6.2	1.39
163	6.1	1.68
22	45.4	2.0
89	11.2	2.7
32	31.2	2.98
143	7	3.4
35	28.5	3.89
51	19.6	4.6

4.

Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
18	55.5	1.0 T
149	6.7	1.39
160	6.2	1.7
22	45.4	2.0
119	8.4	2.17
84	11.9	2.7
29	34.4	2.98
110	9.0	3.4
37	27	3.9

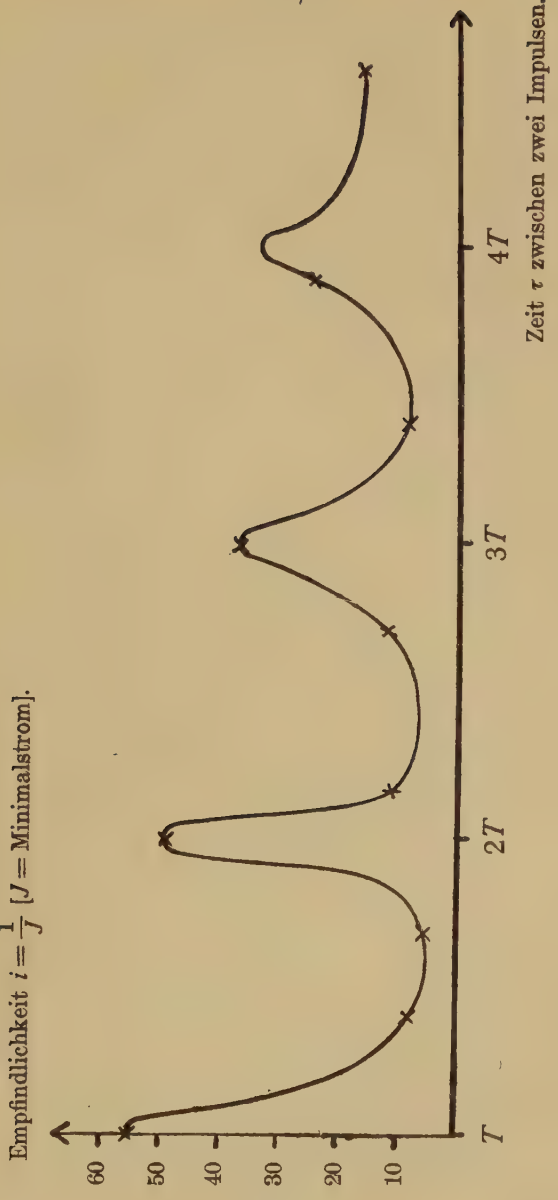

Fig. 13.

Einfachtelephon von Siemens (Meßreihe 1).

bei 815. Die Messungen wurden ausgeführt im Bereich von $\tau = 4{,}5T$ bis $\tau = T$, das entspricht also einer Impulszahl von 181 bis 815. Die vier Meßreihen zeigen in Bezug auf die relativen Werte der Minimalströme bei den einzelnen Impulszahlen ganz den gleichen Verlauf. Die Schwankungen in den absoluten Werten der Minimalströme sind darin begründet, daß die Meßreihen zum Teil an verschiedenen Tagen ausgeführt wurden, und infolgedessen die Empfindlichkeit des Ohres Schwankungen unterworfen war. Man sieht aus den Messungen, daß die Werte der Minimalströme J an den Stellen $\tau = T$, $2T$, $3T$, $4T$ relativ am kleinsten, in den zwischen diesen Stellen liegenden Bereichen dagegen am größten sind. Die Werte der Minimalströme sind wenig verschieden an den Stellen $\tau = T$, $2T$, $3T$ und $4T$. Es zeigt diese Reihe eine nur geringe Abnahme der Minimalströme mit wachsender Impulszahl. Aus diesen Meßreihen geht ferner hervor, daß der Übergang von den Stellen $\tau = T$, $2T$... kleiner Minimalströme zu den Stellen größerer Minimalströme bei verhältnismäßig geringer Veränderung der Impulszahl erfolgt, d. h. es sind die Bereiche der größeren Werte der Minimalströme erheblich weiter ausgedehnt, als die Bereiche der um $\tau = T$, $2T$, $3T$... herumliegenden Werte der kleineren Minimalströme. So weist z. B. der in Fig. 13 zu $\tau = 2{,}16\,T$ gehörige Wert des Minimalstromes bereits den hohen Wert der Minimalströme auf. Nachdem diese Verhältnisse in den Meßreihen am Siemensschen Einfachtelephon untersucht waren, wurden bei den Messungen an den Doppelkopftelephonen die Impulszahlen in den zwischen den Stellen $\tau = T$, $2T$.... liegenden Bereiche immer möglichst genau auf $\tau = \frac{3T}{2}, \frac{5T}{2}$ .... eingestellt, um über die Verhältnisse an diesen Stellen genaueren Aufschluß zu bekommen.

Die Empfindlichkeitsmessungen an dem Doppelkopftelephon von Siemens sind in Tabelle IV zusammengestellt. Man vergleiche auch Fig. 14. Der Eigenton dieses Telephones lag bei 1145. Da es Schwierigkeiten machte, den Unterbrecher auf eine $\tau = T$ entsprechende Impulszahl zu bringen, wurde nur in einem Bereiche von $\tau = \frac{3T}{2}$ an gemessen. Die Impulszahlen um-

Tabelle IV.

Empfindlichkeitsmessungen am Doppelkopftelephon von Siemens.

1.			2.		
Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ	Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
77	12.9	1.55 T	80	12.5	1.55 T
17	58.8	2.0	18	55.5	2.04
47	21.3	2.5	44	22.7	2.51
18	55.5	3.0	18	55.5	3.0
42	23.7	3.5	41	24.3	3.56
20	50	4.0	22	45.4	4.01
30	33.3	4.5	37	27	4.5
21	47.6	5.0	21	47.6	5.0

3.		
Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
74	13.5	1.55 T
15	66.6	2.04
33	30.3	2.51
15	66.6	3.0
47	21.2	3.56
17	58.8	4.0
32	31.2	4.5
22	45.4	5.0

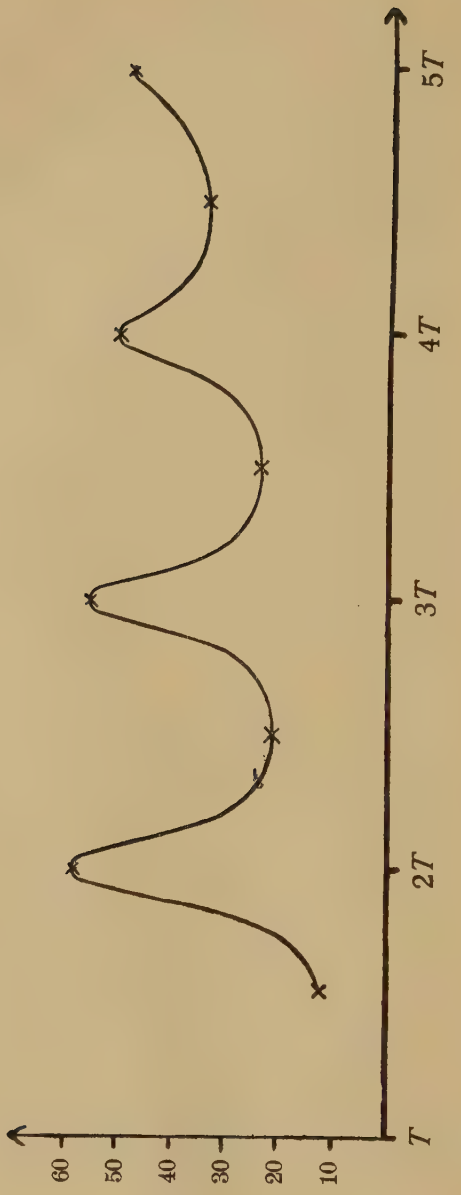

Fig. 14.

Doppelkopftelephon von Siemens (Meßreihe 1).

fassen so den Bereich von ca. 200 bis 750. Es konnte auf eine $\tau = T$ entsprechende Impulszahl verzichtet werden, da die Verhältnisse bis zu einer dem Eigenton des Telephones entsprechenden Impulszahl am Siemens'schen Einfachtelephon untersucht waren Der Verlauf der relativen Werte der Minimalströme ist ganz analog den eben besprochenen Messungen. Genauer untersucht sind die Stellen, die $\tau = \frac{3T}{2}, \frac{5T}{2} \ldots$. entsprechen. Es ist bei den Minimalströmen, die zu $\tau = \frac{3T}{2}, \frac{5T}{2} \ldots$. gehören, eine Vergrößerung der Minimalströme mit wachsender Impulszahl zu beobachten, sodaß der größte Wert des Minimalstromes bei einer Impulszahl liegt, die $\tau = \frac{3T}{2}$ entspricht. Dies ist dann gleichzeitig die Stelle, die innerhalb des untersuchten Bereiches den größten Wert des Minimalstromes aufweist, der überhaupt gemessen wurde.

Zu den Empfindlichkeitsmessungen am Seibt'schen Doppelkopftelephon ist im einzelnen nichts mehr hinzuzufügen, da die Verhältnisse sich vollkommen mit den bisher besprochenen decken. Die einzelnen Versuchszahlen sind in Tabelle V enthalten. Fig. 15 stellt die Meßreihe 1 dar.

Es soll nun zunächst noch über einige qualitative Erscheinungen berichtet werden, die bei der Ausführung der Messungen beobachtet wurden, da diese Erscheinungen zur Erklärung der vorliegenden Verhältnisse beitragen. An den Stellen $\tau = T, 2T, 3T \ldots$ tritt mit besonderer Intensität ein hoher Oberton aus dem Klang hervor. Man kann diesen Ton direkt aus dem ungeschwächten Klang heraushören. Besonders charakteristisch ist aber das Auftreten des hohen Tones, wenn man im Verlauf der Empfindlichkeitsmessungen den die Membran erregenden Strom allmählich schwächt. Es sei z. B. angenommen, die Impulszahl sei beim Siemens'schen Einfachtelephon, dessen Eigenton bei 815 liegt, derartig eingestellt, daß $\tau = 4T$ ist. Dann hört man bei ungeschwächtem Klang den der Impulszahl entsprechenden Grundton nebst verschiedenen Obertönen, aus denen mit besonderer Intensität der Eigenton der Membran hervortritt. Wenn man dann den Telephonstrom schwächt und in die

Tabelle V.

Empfindlichkeitsmessungen am Doppelkopftelephon von Seibt.

1.			2.		
Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ	Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
33	30.3	1.15 T	35	28.5	1.15 T
53	18.8	1.64	50	20	1.64
17	58.8	2.0	16	62.5	2.0
41	24.3	2.53	33	30.3	2.53
16	62.5	2.98	18	55.5	2.98
29	34.3	3.47	27	37.0	3.47
22	45.4	3.9	20	50	3.9

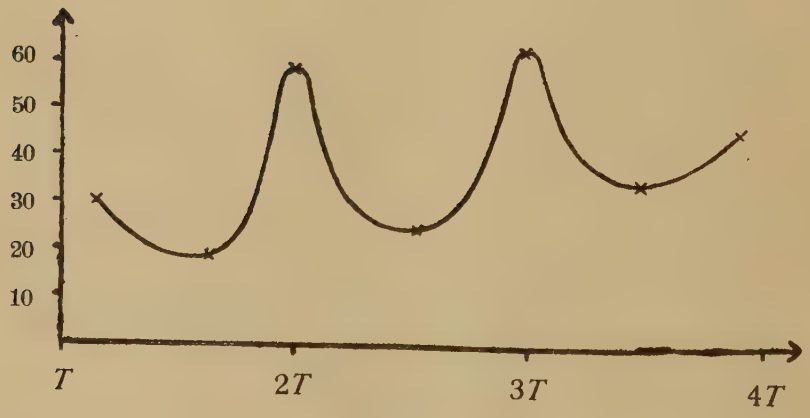

Fig. 15.

Doppelkopftelephon von Seibt (Meßreihe 1).

Nähe des Minimalstroms kommt, hört man nur noch den Eigenton der Membran, während der durch die Impulsfolge bestimmte Grundton nicht mehr gehört wird. Die Erklärung für diese Erscheinung gibt die Theorie. In Figur 5 (p. 24) sind die Intensitätsverhältnisse der sinusförmigen Komponenten des Klanges im Falle $\tau = 4\,T$ dargestellt. Die Intensität des Eigentones der Membran überragt bei weitem die Intensität der übrigen Komponenten. Daher ist es zunächst schon begreiflich, daß man diesen Ton aus dem ungeschwächten Klang heraushört. Wenn man den erregenden Strom schwächt, wird eine gleichmäßige Intensitätsverminderung der einzelnen Komponenten eintreten, sodaß das relative Verhältnis der Intensitäten erhalten bleibt. Selbst wenn nun das Ohr die gleiche Empfindlichkeit für die einzelnen Komponenten hätte, würden bei einer Schwächung des erregenden Stromes allmählich einige Komponenten, die nicht mehr die zur Erzeugung eines Reizes notwendige Intensität besitzen, aus dem Klang für das menschliche Ohr verschwinden. Da nun der Eigenton mit der stärksten Intensität im Klange enthalten ist, wird er auch noch zu hören sein, wenn schon die übrigen Komponenten nicht mehr vom Ohr gehört werden. Nun kommt aber noch hinzu, daß das Ohr eine ganz verschiedene Empfindlichkeit für die einzelnen Komponenten besitzt. Wien hat festgestellt, daß das Ohr am empfindlichsten ist für Töne im Bereich von 1000 bis 2000. Die Empfindlichkeit steigt stark an von den tiefen Tönen bis ungefähr zur Tonhöhe 1000, bleibt nahe gleich bis 2000, um dann schnell wieder abzunehmen. Im oben angenommenen Falle liegt der Eigenton der Membran bei 815, also nahe in dem empfindlichsten Bereich. So werden alle tieferen Komponenten, für die das Ohr viel empfindlicher ist als für den Eigenton, außer dem Grunde, daß sie mit schwächerer Intensität im Klange enthalten sind, wegen der geringeren Empfindlichkeit des Ohres für sie, um so eher eine Intensität erreichen, die nicht mehr zur Erzeugung eines Reizes genügt. Der in Fig. 5 bezeichnete fünfte Oberton, der im vorliegenden Falle die Schwingszahl 1630 besitzen würde, liegt zwar in einem ebenso empfindlichen Gebiete wie der Eigenton, ist aber mit viel geringerer Intensität im Klange vertreten, sodaß er aus diesem Grunde bei Schwächung des erregenden Stromes sehr

bald schon aus dem Klang verschwinden würde. Der sechste, nicht mehr gezeichnete Oberton würde bereits wieder im Gebiete der abnehmenden Empfindlichkeit liegen.

Aus den angeführten Gründen ließen sich in ganz analoger Weise die vorliegenden Erscheinungen in den Fällen $\tau = 2\,T$, $3\,T$, $5\,T$.. erklären. Besonders eigenartig ist die besprochene Erscheinung, wenn man auf den Minimalstrom eingestellt hat und dann plötzlich den erregenden Strom wieder verstärkt. Es tritt dann bei gleichbleibender Impulsfolge eine völlige Änderung des Klangcharakters ein: während man bei ganz schwachen Strömen nur den hohen Eigenton hört, tritt bei verstärktem Strom ein sich aus verschiedenen Komponenten zusammensetzender Klang auf, in dem dann auch wieder der durch die Impulsfolge bestimmte Grundton enthalten ist. Nicht unerwähnt soll schließlich bleiben, daß das Auftreten des Eigentones bei den Stellen $\tau = 2\,T$, $3\,T$.. derartig charakteristisch ist, daß man bei allmählicher Verstellung des Unterbrechers durch direktes Hören die Stellen $\tau = 2\,T$, $3\,T$.... herausfinden kann.

Um die Resultate der Empfindlichkeitsmessungen im Einzelnen zu erklären, sei noch einmal an die Ergebnisse der Theorie erinnert. Es war festgestellt worden, daß einmal die Anfangsamplitude der Membranbewegung in bestimmter Weise, so wie es Fig. 2 darstellt, von der Impulszahl abhängt und ebenso die Zusammensetzung des Klanges in Bezug auf seine Obertöne, bezw. die relativen Intensitätsverhältnisse der einzelnen Komponenten, wie es die Figuren 3 bis 7 zeigen. Beide Umstände werden für die Empfindlichkeit einer bestimmten Impulszahl von Bedeutung sein. Je nachdem die Membran bei einer bestimmten Impulszahl entsprechend der Anfangsamplitude wirksam oder weniger wirksam bewegt wird, werden die Minimalströme kleinere und größere Werte annehmen und, wenn hohe Obertöne, für die das Ohr empfindlich ist, mit besonderer Intensität im Klange enthalten sind, wird das Ohr für einen derartigen Klang sehr empfindlich sein, und der Minimalstrom kleine Werte annehmen.

Die Erklärung für die große Empfindlichkeit an den Stellen $\tau = T$, $2\,T$, $3\,T$, $4\,T$... ist schon teilweise bei Besprechung der auftretenden qualitativen Erscheinungen gegeben worden. Wie

die Figuren 3 bis 5 zeigen, ist an diesen Stellen mit besonderer Intensität der Eigenton der Membran, der in dem empfindlichen Bereich liegt, im Klang vorhanden.

Bei den Messungen an dem Siemenschen Einfachtelephon wurden die Werte der Minimalströme an den Stellen $\tau = T$, $2\,T$, $3\,T$, $4\,T$ annähernd gleichgefunden (vgl. Fig. 13). Es wurde auf diese Verhältnisse bei den Doppelkopftelephonen besonders geachtet und immer die Impulszahl möglichst genau auf $\tau = 2\,T$, $3\,T\ldots$ eingestellt. Wie man sieht, weisen die Werte der Minimalströme an diesen Stellen nur kleine Schwankungen auf, die auf Beobachtungsfehlern beruhen dürften.

Es war daher zu vermuten, daß die Vos'sche Theorie vollkommene Gleichheit der Minimalströme an diesen Stellen verlangte. Vos hat dann auch, veranlaßt durch die experimentellen Ergebnisse vorliegender Arbeit dieses Resultat tatsächlich aus der Theorie hergeleitet. Für die Amplitude eines bestimmten Obertones (n) ergab die Theorie[1]): $i_n = \frac{v_0}{\omega^2 \tau}$ multipliziert mit einem bestimmten Wurzelausdruck, der, wie die Figuren 3, 4 und 5 zeigen, im Falle, daß $\tau = T$, $2\,T$, $3\,T$, $4\,T\ldots$. ist, und n die Ordnung des Obertones bezeichnet, der dem Eigenton der Membran entspricht, einen konstanten Wert hat. v_0, ω, τ stellen die üblichen Größen dar. Wenn man bedenkt, daß der der Membran erteilte Bewegungsimpuls v_0 proportional dem durch das Telephon geschickten Stromimpuls q ist, und man für τ, die Zeit zwischen zwei Impulsen die Impulszahl N einführt, kann man für obigen Ausdruck auch schreiben: $i_n = \frac{c_1 \cdot q \cdot N}{\omega^2} \cdot C$, wo C die durch den Wurzelausdruck gegebene Konstante ist und c ein Proportionalitätsfaktor für die Beziehung $v_0 = c_1 \cdot q \cdot n$. ω bedeutet die Eigenfrequenz der Membran und ist somit ebenfalls eine Konstante. Der Ausdruck $q \cdot N$ ist aber nichts anderes als der Strom, sodaß man für den Minimalstrom J den Wert: $J = \frac{i_n}{C_1}$ bekommt. C_1 ist eine neue Konstante. Die experimentellen Verhältnisse liegen nun, wie oben beschrieben ist, so, daß man in der Nähe der Minimalströme an den Stellen $\tau = T$, $2\,T$, $3\,T\ldots$. nur den Oberton hört, der dem Eigentone ent-

1) vergl. Vos l. c. Gleichung 10.

spricht, sodaß also durch die Empfindlichkeit des Ohres für diesen bestimmten Ton die Empfindlichkeit insgesamt bestimmt ist. Die oben abgeleitete Formel bestätigt dies. Sie sagt nichts anderes aus, als daß der Minimalstrom J im übrigen an den Stellen $\tau = T, 2T, 3T \ldots$ unabhängig ist von dem Verhältnis, in dem τ zu T steht, und so allein bestimmt ist durch die Empfindlichkeit des Ohres für den an den Stellen $\tau = T, 2T \ldots$ auftretenden Eigenton der Membran. Die angeführten Meßreihen zeigen häufig eine kleine Abnahme der Empfindlichkeit in der Reihe $\tau = T, 2T \ldots$ mit abnehmender Impulszahl. Das dürfte seinen Grund darin haben, daß bei tieferen Impulszahlen die Einstellung auf $\tau = 4T$ z. B. ungenauer ist, als auf $\tau = 2T$.

Die Begründung dafür, daß an den Stellen $\tau = \frac{3T}{2}, \frac{5T}{2} \ldots$ größere Werte der Minimalströme vorliegen, ist ganz entsprechend. Zunächst wird die Membran an diesen Stellen wie aus Fig. 2 zu entnehmen ist, weniger wirksam bewegt, und ferner kommen an diesen Stellen nach Fig. 6 und 7 die Obertöne mit geringerer Intensität zum Ausdruck als an den empfindlicheren Stellen. Wenn man nun die Differenzen in den Minimalströmen zwischen empfindlichen und unempfindlichen Stellen näher betrachtet, so sieht man, daß die Differenzen in den Werten der Minimalströme am größten sind beim Übergang von $\tau = T$ zu $\tau = \frac{3T}{2}$ bezw. beim Übergang von $\tau = \frac{3T}{2}$ zu $\tau = 2T$ bei den Doppelkopftelephonen von Siemens und Seibt. Die Differenzen werden kleiner, je mehr man sich kleinen Impulszahlen nähert. Auch diese Erscheinung läßt sich mit Hilfe der Vos'schen Theorie erklären. Einmal sind die Änderungen der Amplitude entsprechend und dann auch die durch die Obertöne gegebenen Verhältnisse. Wenn man z. B. Fig. 3 mit Fig. 6 einerseits und Fig. 5 mit Fig. 7 anderseits vergleicht, so sieht man, daß die Differenzen in Bezug auf die Intensität, mit der die Obertöne ausgeprägt sind, erheblich größer sind beim Übergang von $\tau = T$ zu $\tau = 1{,}5\,T$ als beim Übergang von $\tau = 4T$ zu $\tau = 4{,}5\,T$. Es ist erlaubt, die genannten Figuren mit einander zu vergleichen, da der von τ abhängige Proportionalitätsfaktor, mit dem die in den Figuren

abgetragenen Amplituden noch zu multiplizieren sind, in diesen Fällen nicht sehr verschieden ist, und so durch die Figuren die Änderung in Bezug auf die Intensität der Obertöne angenähert richtig bei den verschiedenen Impulszahlen dargestellt wird.

V. Schluß.

Zusammenfassung der Resultate und Folgerungen aus den Resultaten.

Wenn man die Resultate der Empfindlichkeitsmessungen noch einmal zusammenfaßt, so bekommt man ungefähr folgendes Bild: Die Empfindlichkeit des Telephons bei einer in der Radiotelegraphie üblichen ballistischen Erregung ist zunächst ganz allgemein betrachtet eine vollkommen andere als bei einer Erregung des Telephons durch rein sinusförmigen Wechselstrom. Während bei letzterer Art der Erregung die Empfindlichkeit mit zunehmender Frequenz des die Telephonmembran erregenden Wechselstromes im Bereich von 100 bis 1000 sehr stark wächst, wie die in der Einleitung angeführte Tabelle I von Wien zeigt, und so ein großer Unterschied in der Empfindlichkeit bei tiefer und hoher Frequenz des erregenden Wechselstroms besteht, hat man bei ballistischer Erregung des Telephons keine kontinuierliche Zunahme der Empfindlichkeit, wenn man von tiefen zu hohen Impulsfrequenzen übergeht. Es treten vielmehr periodische Schwankungen in der Empfindlichkeit auf, die durch das Verhältnis von der Impulszahl zur Eigenfrequenz der Telephonmembran bedingt sind, und ferner liegt schon bei niederen Impulszahlen hohe Empfindlichkeit vor, ja man kann sogar unter gewissen Bedingungen bei tiefen Impulsfrequenzen nahezu die größte erreichbare Empfindlichkeit erhalten. Im einzelnen bekommt man maximale Empfindlichkeit, wenn die Impulsfrequenz so gewählt ist, daß τ, die Zeit zwischen zwei Impulsen der Bedingung $\tau = T, 2T \ldots$ genügt, worin T die Eigenschwingungsdauer der Membran bedeutet. Dagegen ist die Empfindlichkeit geringer, wenn die Zeit τ zwischen zwei Impulsen der Beziehung $\tau = \frac{3T}{2}, \frac{5T}{2} \ldots$ genügt. Die ungünstigste Stelle für die Empfindlichkeit innerhalb des Bereiches, in dem gemessen wurde,

also in einem Bereiche von $\tau = T$ bis $\tau = 5\,T$ liegt bei einer Impulsfrequenz die $\tau = \frac{3\,T}{2}$ entspricht, also in jedem Falle bei einer verhältnismäßig hohen Impulsfrequenz. Noch ungünstiger würde die Empfindlichkeit an einer Stelle werden, bei der die Impulsfrequenz $\tau = \frac{T}{2}$ entspricht, wie aus der Theorie von Vos sich leicht folgern läßt. Bei einer derartig hohen Impulszahl wurde jedoch nicht gemessen.

Im Einzelnen erklärt und begründet werden diese Verhältnisse der Empfindlichkeit eines ballistisch erregten Telephons, wie im Abschnitt IV, 4 näher auseinandergesetzt ist, durch die von Vos entwickelte Theorie einer ballistisch erregten Telephonmembran.

Für die Praxis der drahtlosen Telegraphie würde in Bezug auf die Empfangsstation folgen, daß man hohe, nahezu gleiche Empfindlichkeit im Empfangstelephon hat, wenn man die Funkenzahl im Sender derartig reguliert, daß $\tau = T,\ 2\,T,\ 3\,T \ldots$ wird. Am günstigsten würde eine Funkenzahl sein, die genau $\tau = T$ entspricht. Hierauf ist schon häufiger, allerdings aus ganz allgemeinen Überlegungen heraus, im Hinblick auf Resonanzerscheinungen hingewiesen worden, z. B. von Boas[1]). Sehr wesentlich ist, daß keineswegs eine hohe Funkenzahl unter allen Umständen zu großer Empfindlichkeit im Empfangstelephon führt. Wenn die Funkenzahl zur Eigenfrequenz der benutzten Membran gerade in einem derartigen Verhältnis steht, daß $\tau = \frac{3\,T}{2}$ wird, hat man im Empfangstelephon eine äußerst ungünstige Stelle für die Empfindlichkeit. Da aus den Messungen folgt, daß der um $\tau = T$ herumliegende Bereich erhöhter Empfindlichkeit klein ist, d. h. eine schon geringe Änderung der Impulszahl aus dem empfindlichen in den unempfindlichen Bereich führt, würde eine Bestimmung der Eigenfrequenz des Empfangstelephones und eine entsprechende Einstellung der Funkenzahl am Sender sehr zu empfehlen sein, wenn es sich darum handelt, möglichst große Reichweite zu erzielen.

1) H. Boas, Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie, Bd. 5, p. 440 1911.

Anhang.

1. Versuche bei größerem Blockkondensator (0,1 M. F. und 0,5 M. F.).

Die bisher besprochenen Empfindlichkeitsmessungen (Abschnitt IV, 4) sind, wie schon erwähnt, bei einem Blockkondensator C_3 (vgl. Fig. 10) von 1000 cm Kapazität ausgeführt worden. Die Wahl des Blockkondensators von dieser Größe war durch die in der Empfangsschaltung der drahtlosen Telegraphie gebräuchlichen Dimensionen gegeben. Es sollen nun noch ganz kurz einige Messungen bei größerem Blockkondensator erwähnt werden. Die Tabelle VI (vgl. Fig. 16) stellt zwei Meßreihen dar, die am Siemens'schen und Seibt'schen Doppelkopftelephon ausgeführt wurden bei einer Größe des Blockkondensators von 0,1 M. F. gleich 90000 cm. Obwohl dieser Blockkondensator erheblich größer ist als der bei den früheren Messungen benutzte, läßt sich ein Unterschied in den Empfindlichkeitsverhältnissen gegenüber den bei einem Blockkondensator von 1000 cm Kapazität ausgeführten Messungen nicht bemerken. Es treten auch bei großem Blockkondensator ganz dieselben Schwankungen in der Empfindlichkeit auf wie früher; man kann daraus wohl schließen, daß die Art und Weise der Erregung der Telephonmembran beim Übergang zum großen Blockkondensator sich nicht wesentlich geändert haben kann.

Schließlich wurde noch eine Meßreihe bei einem Blockkondensator von 0,5 M. F. an dem Siemens'schen Einfachtelephon aufgenommen (vgl. Fig. 17). Bei dieser Meßreihe macht sich allerdings gegen früher ein Unterschied bemerkbar. Einmal

Tabelle VI.

1. Doppelkopftelephon von Seibt. Größe des Blockkondensators 0,1 M. F.

Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
17	58.8	3.92 T
27	37.3	3.47
17	58.8	2.98
32	31.2	2.52
16	62.5	2.0
46	21.7	1.55
37	27.0	1.26

2. Doppelkopftelephon von Siemens. Größe des Blockkondensators 0,1 M. F.

Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
32	31.2	5.0 T
34	29.4	4.5
25	40	4.0
39	25.8	3.47
22	45.4	3.0
55	18.1	2.51
21	47.6	2.0
49	20.0	1.7

3. Einfachtelephon von Siemens. Größe des Blockkondensators 0,5 M. F.

Minimalstrom J	Empfindlichkeit i	Zeit zwischen zwei Impulsen τ
125	8.0	1.39 T
234	4.2	1.69
34	29.3	2.0
107	9.3	2.19
86	11.6	2.73
34	29.3	2.98
134	7.4	3.4
33	30.0	3.98

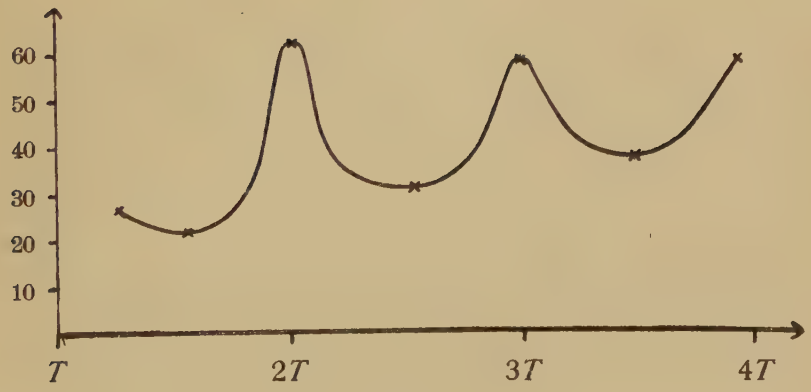

Fig. 16.

Doppelkopftelephon von Seibt. Größe des Blockkondensators 0,1 M. F. (vgl. Tab. VI, 1).

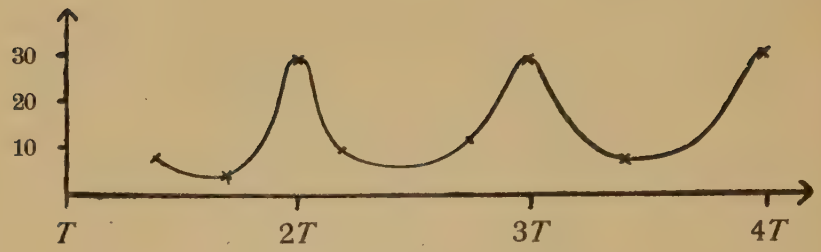

Fig. 17.

Einfachtelephon von Siemens. Größe des Blockkondensators 0,5 M. F. (vgl. Tab. VI, 3).

sind die Differenzen zwischen maximaler und minimaler Empfindlichkeit weniger ausgesprochen als bisher und dann scheinen die absoluten Werte der Minimalströme insgesamt gegenüber den früheren Messungen größer zu sein. Auf eine nähere Diskussion dieser Resultate einzugehen, ist nicht möglich, da die Verhältnisse im Detektorkreis im Einzelnen noch unklar sind.

---

2. Versuche der Marburger radiotelegraphischen Station über die Empfindlichkeit des Empfangstelephones bei verschiedenen Funkenfrequenzen in der Sendestation.

Die Resultate vorliegender Arbeit in Bezug auf die Empfindlichkeit des Empfangstelephones in Abhängigkeit vom Verhältnis der Impulsfolge zur Eigenschwingungsdauer der Telephonmembran stehen im vollen Einklang mit einigen praktischen Versuchen, welche von E. Take und M. Vos an der radiotelegraphischen Versuchsstation des Marburger Physikalischen Institutes ausgeführt wurden. Die Wellen wurden ausgestrahlt von der hiesigen Sendestation, die nach dem System der tönenden Löschfunken eingerichtet ist; empfangen wurde mit Hilfe von Erdantennen in Nordenau bei Winterberg (Sauerland), das in der Luftlinie ca. 50 km von Marburg entfernt ist.

Die Funkenzahl in der Sendestation wurde bei diesen Versuchen so reguliert, daß die Zeit τ zwischen zwei Impulsen zunächst gleich T, dann gleich $2\,T$ und schließlich gleich $\frac{3\,T}{2}$ war; T bedeutet wie bisher die Eigenschwingungsdauer der Membran des Empfangstelephons. Die Station ist in der üblichen Weise mit einer Anzahl von hintereinandergeschalteten Löschfunkenstrecken ausgestattet, und man kann dadurch, daß man mehr oder weniger Funkenstrecken einschaltet, die ausgestrahlte Energie verändern. Die Versuche wurden nun in der Weise ausgeführt, daß zunächst bei einer Funkenfrequenz, die $\tau = T$ entsprach, in verabredeter Weise in der Sendestation bei konstanter Funkenfrequenz allmählich von einer bestimmten Anzahl an immer weniger Funkenstrecken eingeschaltet wurden, sodaß also die ausgestrahlte Energie immer mehr abnahm. In der Empfangsstation war dann festzustellen, bei welcher Mindestzahl von Funkenstrecken sich noch gerade ein Telegramm mit Deutlichkeit aufnehmen ließ. Derartige Versuche wurden bei den drei oben angegebenen Funkenfrequenzen ausgeführt. Und da stellte es sich heraus, daß man zwar bei ungefähr vier Funkenstrecken in der Sendestation bei allen drei Tonhöhen noch die Telegramme aufnehmen konnte; es war aber die Lautstärke am ungünstigsten bei einer Funkenzahl, die $\tau = \frac{3\,T}{2}$ entsprach; und zwar lagen die Verhältnisse im Einzelnen so, daß man gleiche Lautstärke bei den verschiedenen Tonhöhen hatte, wenn bei einer Funkenfrequenz die $\tau = T$ und $\tau = 2\,T$ entsprach ca. 4 bezw. 6 Funkenstrecken, dagegen bei einer Funkenfrequenz die $\tau = \frac{3\,T}{2}$ entsprach, ca. 8 Funkenstrecken in der Sendestation eingeschaltet waren.

Die angestellten Versuche waren im wesentlichen qualitativer Natur, es soll daher nur auf Folgendes aufmerksam gemacht werden. Bei einer Funkenfrequenz, die $\tau = 2\,T$ entspricht, genügen unter obigen Verhältnissen um eine bestimmte Lautstärke bei einer Entfernung von ca. 50 km zu erlangen, ungefähr 6 Funkenstrecken. Wenn man nun bei gleicher Anzahl von Funkenstrecken in der Sendestation zu einer Funkenfrequenz, die $\tau = \frac{3\,T}{2}$

entspricht, übergehen würde, so hätte man geringere Lautstärke im Empfangstelephon, trotzdem die ausgestrahlte Energie infolge der erhöhten Funkenfrequenz beim Übergang von einer Frequenz, die $\tau = 2\,T$ zu einer die $\tau = \frac{3\,T}{2}$ entspricht, größer geworden ist.

Zu erklären sind diese Verhältnisse dadurch, daß man im ersten Falle eine Funkenfrequenz hat, die in Bezug auf die Empfindlichkeit des Empfangstelephones sehr günstig ist, im zweiten Falle dagegen eine überaus ungünstige.

Vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institute der Universität Marburg ausgeführt. Es sei mir gestattet, auch an dieser Stelle meinem hochverehrten Lehrer

Herrn Prof. Dr. F. Richarz

für das rege Interesse, das er meiner Arbeit entgegenbrachte, meinen wärmsten Dank auszusprechen.

Ebenso danke ich herzlichst

Herrn Dr. M. Vos

für die vielen Ratschläge und die dauernde, liebenswürdige Unterstützung.

Herrn Privatdozenten Dr. E. Take

danke ich ebenfalls vielmals für die mir gütigst erteilten Ratschläge.

Lebenslauf.

Am 10. Januar 1891 wurde ich, Alfred Wratzke, in Magdeburg als Sohn des Ingenieurs Alfred Wratzke geboren. Ich bin evangelischen Bekenntnisses und preußischer Staatsangehöriger. Nach dreijährigem Besuch der Volksschule zu Essen-Rüttenscheid, wohin meine Eltern übergesiedelt waren, trat ich Ostern 1900 in das Städtische Gymnasium daselbst ein, das ich Ostern 1909 mit dem Zeugnis der Reife verließ, um Naturwissenschaften und Mathematik zu studieren. Die ersten vier Semester war ich in Marburg immatrikuliert, im Sommer 1911 in München und seit Winter 1911/12 wieder in Marburg. Das examen rigorosum bestand ich am 17. Dezember 1913. In der folgenden Zeit bereitete ich mich in Marburg auf das Staatsexamen vor und war Assistent am Physikalischen Institut der Universität.

Meine akademischen Lehrer, denen ich zu großem Danke verpflichtet bin, waren in Marburg: Bauer, Feußner, Fries, Hartmann, Hensel, Kayser, Neumann, Richarz, Schenck, Schulze, Schücking, Take, Wegener, Zincke; in München: Röntgen, Sommerfeld, Voß, Wagner.